



**Carlos Leandro
Perdigão da Costa
Português**

**Programação de Modelos de Transporte Sedimentar
Comparação de Soluções**



**Carlos Leandro
Perdigão da Costa
Português**

**Programação de Modelos de Transporte Sedimentar
Comparação de Soluções**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha família pelo incansável apoio.

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

O presente trabalho não teria sido realizado sem o apoio e incentivo dados ao autor desta dissertação, que desta forma pretende agradecer a todos os que de alguma forma intervieram na sua realização.

Ao professor Carlos Coelho, orientador científico, pela motivação e disponibilidade demonstrada em todas as fases do desenvolvimento desta dissertação.

A todos os professores do departamento de Engenharia Civil, que de alguma forma contribuíram para o esclarecimento de questões informáticas.

A todos os amigos que com os seus esclarecimentos contribuíram para conseguir realizar todos os objectivos deste trabalho.

À Ana Renata, pela companhia incansável nas longas horas de escrita e de pesquisa e por todo o apoio e motivação.

À minha família, por todo o apoio e dedicação prestada ao longo destes anos sem a qual não seria possível a minha formação como estudante e como pessoa.

palavras-chave

hidráulica fluvial, transporte sedimentar, arrastamento, suspensão, cálculo automático

resumo

Na dissertação apresentada procura-se estudar os fenómenos relacionados com o transporte sedimentar, que apresentam uma grande importância na hidráulica fluvial. A estimativa do transporte sólido permite prever erosões, assoreamentos, volumes mortos em albufeiras e o dimensionamento de canais estáveis, sem movimento de material sólido. As condições de equilíbrio, assoreamento ou erosão de um determinado curso de água, podem ser modificadas por obras, devendo existir um estudo prévio que preveja possíveis alterações hidrológicas.

A carga sólida da rede hidrográfica, ao ser deslocada pelos respectivos escoamentos líquidos, dá origem ao transporte sedimentar. Este processo é definido pelas características do escoamento e dos sedimentos. O transporte sólido pode ser realizado basicamente de duas formas, em suspensão na massa líquida ou por arrastamento no fundo. Por vezes, não existe uma distinção nítida entre o transporte em suspensão e o transporte por arrastamento, pelo que pode ser considerada uma forma de transporte de características intermédias, o transporte por saltação.

É efectuada a apresentação de diversos modelos que traduzem a representação dos fenómenos de transporte sedimentar. Numa primeira secção é efectuada a descrição de diversas tentativas de caracterização dos processos de transporte ao longo dos tempos e de imediato é constatado que existe alguma dificuldade em estimar os volumes de transporte que se obtêm na aplicação desses modelos.

A concepção de uma ferramenta de cálculo automático apresenta grandes vantagens no estudo do transporte sólido, permitindo a rápida obtenção de resultados para diferentes situações.

Na tentativa de compreender os processos de transporte sólido, são expostos diversos conceitos associados ao transporte sedimentar e avaliada a sensibilidade dos parâmetros intervenientes. A definição de uma metodologia eficaz que permita estimar o caudal sólido transportado é ainda limitada, sendo este trabalho um contributo na obtenção desses objectivos.

keywords

fluvial hydraulics, sediment transport, bedload, suspended, numerical modelling

abstract

In the present dissertation it is intended to study phenomena related to sediment transport, which is extremely relevant in fluvial hydraulics. The solid transportation estimate allows the prediction of erosion points, silting, volume of sediments in reservoirs and the designing of stable channels, without the movement of solid material. The equilibrium conditions, silting or erosion of a particular stretch of water, can be modified by construction, requiring a prior study that predicts hydrological changes.

The dry cargo of the river system, while being moved by its liquid flow, originates sediment transport. This process is defined by flow and sediment characteristics. The solid transport can be achieved by two means, suspension in liquid mass or bedload transport in the fund. Sometimes, there isn't a clear distinction between the transport in suspension and bedload transport, and can be considered an intermediate form of transport, transportation by saltation.

Several models are presented, which are result of the representation of sediment transport phenomena. In the first section a description of various attempts to characterize the processes of transport over time is made and it is immediately noted that there is some difficulty in estimating the volume of transport that occurs in the implementation of these models.

The design of a tool for automatic calculation offers significant advantages in the study of solid transport, allowing a quick achievement of results for different situations.

In attempt to understand the processes of solid transport, several concepts associated to sediment transport are show and the sensitivity of the parameters involved are assessed. The definition of an effective methodology that allows the estimating of the transported solid volume is still limited, being this work a contribution in the achieving of these objectives.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE CAUDAIS SÓLIDOS.....	5
2.1.	CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO E DO ESCOAMENTO	6
2.1.1.	Aceleração da gravidade	6
2.1.2.	Massa volúmica e peso volúmico	6
2.1.3.	Viscosidade	7
2.2.	PROPRIEDADES DOS SEDIMENTOS	7
2.2.1.	Dimensão	7
2.2.2.	Densidade.....	8
2.2.3.	Forma	9
2.2.4.	Porosidade.....	9
2.2.5.	Peso volúmico	9
2.2.6.	Ângulo de atrito interno	10
2.3.	CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS.....	10
2.3.1.	Tensão crítica de arrastamento.....	11
2.3.2.	Velocidade crítica	13
2.4.	PARÂMETROS DE CÁLCULO	14
2.4.1.	Coeficiente de arrastamento.....	15
2.4.2.	Rugosidade relativa do fundo.....	15
2.4.3.	Velocidade de queda das partículas	18
2.4.4.	Concentração de referência e distância ao fundo	19
2.4.5.	Velocidade de atrito	21
2.4.6.	Parâmetro de shields	22
2.4.7.	Diâmetro adimensional do material do fundo	23
2.4.8.	Diâmetro representativo do material transportado em suspensão	23
2.4.9.	Parâmetro adimensional de capacidade de transporte.....	23
2.4.10.	Altura da forma do fundo.....	24
2.5.	TRANSPORTE SÓLIDO	24
2.5.1.	Transporte sólido por arrastamento.....	25
2.5.2.	Transporte sólido em suspensão.....	28
2.5.3.	Transporte sólido total	29
3.	TABELA DE CÁLCULO.....	33
4.	TESTE DE COMPORTAMENTO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADES	41

4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS	41
4.1.1.	Tensão crítica de arrastamento	42
4.1.2.	Velocidade crítica.....	44
4.2.	PARÂMETROS DE CÁLCULO DO TRANSPORTE SÓLIDO	46
4.2.1.	Coeficiente de arrastamento	46
4.2.2.	Velocidade de queda das partículas	48
4.2.3.	Concentração de referência e distância ao fundo	50
4.3.	TRANSPORTE SÓLIDO	53
4.3.1.	Transporte sólido por arrastamento.....	54
4.3.2.	Transporte sólido em suspensão.....	58
4.3.3.	Transporte sólido total.....	62
4.4.	FRACÇÃO CORRESPONDENTE A CADA TIPO DE TRANSPORTE	66
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
5.1.	SÍNTESE DE RESULTADOS	69
5.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	71
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição granulométrica dos sedimentos (Liu, 2001).....	8
Figura 2 - Esquema de forças actuantes sobre uma partícula (Cardoso, 1998).....	11
Figura 3 - Esquema de forças actuantes sobre uma partícula em suspensão (Liu, 2001).	18
Figura 4 - Variação da concentração de sedimentos e da velocidade do escoamento em profundidade (Coelho, 2006).	20
Figura 5 - Folha indicativa das características gerais do caso em estudo.	34
Figura 6 - Folha de resultados gerais.	35
Figura 7 - Folha de caracterização do início do movimento das partículas.	36
Figura 8 - Folha de cálculo do transporte sólido por arrastamento.	37
Figura 9 - Folha de cálculo do transporte sólido em suspensão.	38
Figura 10 - Folha de cálculo do transporte sólido total.	39
Figura 11 - Variação da tensão crítica (τ_c) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}) para diferentes factores de forma (η), segundo Schoklisch.....	42
Figura 12 - Variação da tensão crítica (τ_c) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).	43
Figura 13 - Variação da velocidade crítica (U_{cr}) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).	45
Figura 14 - Coeficiente de arrastamento (C_d) em função da razão entre a rugosidade relativa do fundo e a altura do escoamento (z_0/h).	47
Figura 15 - Variação da velocidade de queda das partículas (w_s) em função da dimensão média dos sedimentos (D_{50}).....	48
Figura 16 - Variação da distância ao fundo (z_a) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).	51
Figura 17 - Variação da concentração de referência (C_a) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).	52
Figura 18 - Caudal sólido por arrastamento (q_b) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).	55
Figura 19 - Média do caudal sólido por arrastamento (q_b) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).	57
Figura 20 - Caudal sólido em suspensão (q_s) em função da dimensão média das partículas (D_{50}). ...	59

Figura 21 - Caudal sólido em suspensão (q_s) para diferentes métodos de cálculo da velocidade de queda das partículas (w_s).	60
Figura 22 - Caudal sólido em suspensão (q_s) para diferente método de cálculo da concentração de referência (C_a) à distância z_a do fundo.	61
Figura 23 - Caudal sólido total (q_t) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).	63
Figura 24 - Média do caudal sólido total (q_t) em função da dimensão média das partículas (D_{50}). .	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Variação da massa volúmica da água (ρ) em função da temperatura (Netto <i>et al.</i> , 1998).	6
Tabela 2 - Variação da viscosidade (ν) em função da temperatura (Netto <i>et al.</i> , 1998).	7
Tabela 3 - Classificação das partículas sedimentares segundo o diâmetro de peneiração (Cardoso, 1998).	8
Tabela 4 - Peso volúmico aparente seco da areia em função da granulometria (Cardoso, 1998).	10
Tabela 5 - Coeficientes α e β para determinação do coeficiente de arrastamento (Soulsby, 1997).	15
Tabela 6 - Valores médios da rugosidade relativa (z_0) para diferentes tipos de sedimentos do fundo (Soulsby, 1997).	17
Tabela 7 - Coeficientes de Ackers e White (Soulsby, 1997).	32
Tabela 8 - Coeficientes de Ackers e White revistos (Soulsby, 1997).	32
Tabela 9 - Comparação da tensão crítica (N/m^2).	44
Tabela 10 - Comparação da velocidade crítica (m/s).	45
Tabela 11 - Comparação do coeficiente de arrastamento.	47
Tabela 12 - Comparação da velocidade de queda das partículas (m/s).	49
Tabela 13 - Comparação da distância ao fundo (m).	51
Tabela 14 - Comparação da concentração de referência.	53
Tabela 15 - Comparação do transporte por arrastamento (m^3/s).	56
Tabela 16 - Comparação do transporte sólido total (m^3/s).	63
Tabela 17 - Parcelas de transporte por arrastamento e em suspensão, no transporte total.	67

SIMBOLOGIA

a	parâmetro de transporte sólido definido na fórmula de Madsen;
a_0, a_1, a_2, a_3	constantes definidas na fórmula de Shen e Hung;
A_{aw}, C_{aw}, F_{aw}	parâmetros de transporte total definidos no método de Ackers e White;
C'	parcela do coeficiente de Chézy associada a k' ;
c, c_1, c_2	variáveis auxiliares definidas no conceito de tensão crítica;
C_a	concentração de referência observada à distância z_a do fundo;
C_d	coeficiente de arrastamento;
CS_{ppm}	concentração do material sólido transportado em partes por milhão;
D	diâmetro das partículas;
D^*	parâmetro adimensional que caracteriza o diâmetro do material do fundo;
D^*_{*s}	parâmetro adimensional que caracteriza o diâmetro representativo do material transportado em suspensão;
D_n	diâmetro de peneiração tal que $n\%$ em peso é mais fino;
D_s	diâmetro representativo do material transportado em suspensão;
F_1	parâmetro da fórmula de Einstein-Brown;
F_b	parâmetro de transporte sólido definido na fórmula de Bagnold;
F_D	força de arrastamento;
F_m	parâmetro de transporte sólido definido na fórmula de Madsen;
F_r	variável auxiliar definida por Van Rijn;
F_y	parâmetro de transporte sólido definido na fórmula de Yalin;
g	aceleração da gravidade;
h	altura do escoamento;
I_1, I_2	parâmetros de transporte sólido definidos na fórmula de Einstein;
J	perda de carga unitária, aproximadamente igual ao declive em canais pouco inclinados;
k	rugosidade absoluta equivalente de Nikuradse;

k'	parcela da rugosidade equivalente de Nikuradse atribuível directamente ao grão;
K_r	coeficiente de Manning-Strickler devido à rugosidade do grão;
K_s	coeficiente de Manning-Strickler devido à rugosidade total;
k_s	rugosidade de Nikuradse;
m, n	expoentes definidos no método de Ackers e White;
n'	coeficiente de Manning;
q'_{sp}	caudal sólido arrastado por unidade de largura (peso submerso);
q_b	caudal sólido arrastado por unidade de largura (volume);
q_s	caudal sólido em suspensão por unidade de largura (volume);
q_t	caudal sólido total por unidade de largura (volume);
R	raio hidráulico;
s	densidade do grão das partículas de material sólido;
T	parâmetro adimensional de capacidade de transporte;
U	velocidade média do escoamento;
u_*	velocidade de atrito junto ao fundo;
u_{*c}	velocidade de atrito junto ao fundo correspondente ao início do transporte sólido;
u'_*	velocidade de atrito junto ao fundo associada ao escoamento sobre leito plano;
U_{cr}	velocidade média crítica;
W	peso submerso;
W_*	parâmetro de transporte sólido definido por Parker;
w_s	velocidade de queda das partículas do material sólido do fundo;
X'	coeficiente definido na fórmula de Shen e Hung;
Y	parâmetro de Shields;
y_*	número de Rouse;
y'_*	número de Rouse corrigido segundo Van Rijn;
Y_{cr}	parâmetro de Shields correspondente ao início do movimento;

Z	submersão relativa;
z_0	rugosidade relativa do fundo;
z_a	distância do fundo para a qual se supõe conhecida a concentração de referência;
Z_n	submersão relativa definida para o diâmetro D_n ;
α, β	coeficientes intervenientes na determinação do coeficiente de arrastamento (C_d);
β'	razão entre o coeficiente de difusão de sedimentos e a viscosidade aparente;
γ	peso volúmico da água;
γ'_s	peso volúmico do grão do material sólido submerso;
γ_s	peso volúmico do grão do material sólido;
Δ	altura das configurações de fundo;
η	factor de forma dos sedimentos;
θ	ângulo do fundo com a horizontal;
θ_r	ângulo de repouso ou de talude natural;
κ	constante universal de Von Karman;
ν	viscosidade cinemática;
ρ	massa volúmica;
σ_d	coeficiente de graduação;
τ_0	tensão média de arrastamento no fundo;
τ_c	tensão de arrastamento crítica;
v	porosidade;
v^*	parâmetro do escoamento definido por Parker;
Φ	parâmetro adimensional de transporte por arrastamento;
ϕ_i	ângulo de repouso dos sedimentos;
Ψ'	parâmetro de transporte sólido definido na fórmula de Einstein-Brown;
ϕ'	correção introduzida por Van Rijn no número de Rouse.

1. INTRODUÇÃO

Associado ao escoamento de água em rios e canais de fundo móvel ocorre, geralmente, o transporte de sedimentos, sendo este caudal sólido transportado, uma das variáveis determinantes na maioria dos problemas da hidráulica fluvial. Existe uma grande variabilidade do caudal sólido de rio para rio, o que revela o elevado número de variáveis hidrológicas de que depende este parâmetro. Contudo, existem actualmente diversos métodos de cálculo do caudal sólido, obtidos por via analítica ou experimental, que permitem estimar o volume sólido transportado.

Os fenómenos relacionados com o transporte sólido são muito importantes na hidráulica fluvial, o seu conhecimento permite prever erosões em margens, fundos ou junto de singularidades ou assoreamentos em margens, fundos, junto de singularidades, albufeiras, vias navegáveis, circuitos hidráulicos, captações, bem como dimensionar canais estáveis, sem movimento de material sólido. As condições de equilíbrio, assoreamento ou erosão dum determinado curso de água, podem ser modificadas por obras, que muitas vezes não têm sequer essa finalidade.

A carga sólida da rede hidrográfica, ao ser deslocada pelos respectivos escoamentos líquidos, dá origem ao transporte sólido, este transporte é função das características das linhas de água. A verificação de tendências a longo prazo não exclui a possibilidade de ocorrências temporárias de deposições ou erosões em sentido contrário ao do processo geral.

O transporte sólido nos cursos de água pode ser feito de duas formas, em suspensão na massa líquida ou por arrastamento no fundo. No transporte em suspensão as partículas sólidas são deslocadas no seio da água, sem contacto com o leito. Em condições constantes de escoamento, a velocidade das partículas em suspensão não varia sensivelmente e o seu valor médio é próximo do da velocidade média do escoamento. No transporte por arrastamento, as partículas são deslocadas rolando ou escorregando sobre as partículas que constituem o leito, sem perderem o contacto com este. Por vezes, não existe uma distinção nítida entre o transporte em suspensão e o transporte por arrastamento, pelo que pode ser considerada uma forma de transporte de características intermédias, o transporte por saltação. Nesta forma de transporte, as partículas deslocam-se por saltos, alternando as fases de transporte por arrastamento e as fases de transporte em suspensão.

O objectivo deste documento consiste no estudo do fenómeno de transporte sólido e realização de uma análise global dos vários métodos de transporte sólido mais utilizados, elaborando uma descrição dos mesmos.

O objectivo fundamental da investigação desenvolvida foi a programação de uma folha de cálculo, contendo diversas metodologias de cálculo do transporte sólido bem como os parâmetros que intervêm na sua determinação, de forma a possibilitar uma comparação rápida de resultados. Com base na plataforma informática desenvolvida, efectuaram-se testes de exemplos genéricos para análise dos limites de aplicação de cada modelo e da sensibilidade a cada variável.

Os trabalhos desenvolvidos no âmbito desta dissertação apresentam-se divididos em cinco capítulos, distinguindo-se em cada um vários subcapítulos. O primeiro capítulo é introdutório descrevendo sucintamente o fenómeno em estudo, os objectivos desenvolvidos e a organização deste documento.

No capítulo 2 foi efectuada uma apresentação do estado da arte no que respeita a métodos e estratégias de análise do transporte sólido. Neste capítulo foram descritas as principais características do sistema hídrico, no que diz respeito ao escoamento e sedimentos, que intervêm no processo de transporte. Nesta fase do trabalho foram enumerados vários métodos de cálculo que permitem prever as condições para o início do transporte, englobando duas abordagens distintas, com base na determinação da tensão crítica de arrastamento ou pela obtenção da velocidade crítica. Conhecidas as condições de início de transporte, são apresentados alguns dos parâmetros que influenciam directamente o volume sólido transportado. Por fim, foram descritos alguns dos modelos de cálculo mais utilizados para estimativa do caudal sólido, que se subdividem em transporte sólido por arrastamento, em suspensão e total.

O capítulo 3 descreve o procedimento efectuado para a elaboração da ferramenta de cálculo automático que teve por base os conhecimentos adquiridos. Nesta secção foi apresentada uma visão global do trabalho desenvolvido para a realização das folhas de cálculo e foram descritos alguns aspectos que devem estar presentes quando se procede à sua utilização. Encontram-se ainda referidos alguns pormenores tais como avisos e condições de utilização que devem ser tidas em conta pelo operador durante o estudo de um caso prático. No desenvolvimento deste capítulo que resulta na concepção de uma ferramenta de cálculo existiu toda uma base de pesquisa e de estudo que possibilitou a construção de uma plataforma de utilização automática e que permite de uma forma rápida e simples a estimativa do caudal sólido transportado.

No capítulo 4 é apresentada uma análise geral dos vários parâmetros que exprimem alguma influência na estimativa do caudal sólido transportado. Esta análise teve como finalidade a avaliação de cada método de cálculo e possibilitar a comparação dos resultados obtidos por modelos diferente para um determinado parâmetro. Desta forma foi possível reflectir sobre

possíveis variações existentes nos resultados obtidos, procurando tentar dar resposta e justificação a estas variações.

O último capítulo resume as conclusões mais significativas que resultaram deste estudo, as maiores dificuldades encontradas e descreve possíveis desenvolvimentos futuros para o tema apresentado nesta dissertação.

2. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE CAUDAIS SÓLIDOS

Os fenómenos de transporte sólido têm uma grande importância no estudo da hidráulica fluvial já que o seu conhecimento permite prever erosões, assoreamentos, dimensionar canais estáveis, conhecer o caudal sólido transportado, estudar a deposição dos sedimentos em reservatórios e albufeiras, elaborar estudos de erosão e deposição generalizadas e o cálculo de erosões localizadas junto a pilares de pontes ou de obstáculos salientes nas margens (Cardoso, 1998).

As condições de equilíbrio entre erosão e assoreamento de um determinado curso de água dependem da capacidade de transporte sólido e da carga sólida da rede hidrográfica. A capacidade de transporte dos rios varia ao longo do seu percurso e depende essencialmente do declive do fundo e da velocidade média do escoamento. Enquanto a capacidade de transporte sólido for superior à carga sólida, o curso de água tem capacidade energética para escavar o seu próprio leito levando a fenómenos de erosão. No entanto, quando a capacidade de transporte for inferior à carga sólida, vão ocorrer fenómenos de assoreamento, aumentando a cota do leito. Estas circunstâncias do escoamento começam por depender das condições críticas de início de transporte sólido ou condições de movimento incipiente (Lencastre e Franco, 1992).

Na análise da capacidade de transporte sólido, deve haver uma distinção entre transporte potencial e transporte real. Em certas situações, os cursos de água podem possuir elevada capacidade de transporte, mas pode não originar uma elevada carga sólida no escoamento. Este fenómeno ocorre pela existência de partículas com grande dimensão e sucede muitas vezes a montante dos rios, junto à nascente.

Embora o conceito de transporte sólido seja simples, na prática há dificuldades na uniformidade de interpretação deste conceito, podendo entender-se como início do transporte sólido quando uma só partícula entra em movimento, quando acontece a algumas partículas ou quando se inicia o movimento generalizado das partículas do fundo. Este conceito tem vindo a ser estudado por vários autores, na procura de um modelo de cálculo que possibilite estimar com rigor os fenómenos envolventes no transporte sólido. As fórmulas propostas resultam da via experimental, principalmente da observação da natureza ou simulação em laboratório, aplicando-se na maioria dos casos a situações particulares para determinadas características bem definidas em que se baseia cada estudo, não podendo ser bem extrapoladas para todas as situações (Álvares e Pimenta, 1998).

Todavia, continuam a existir dificuldades de traduzir matematicamente num modelo, o caudal sólido transportado para a globalidade das situações existentes, daí o interesse em testar os

2. Métodos de estimativa de caudais sólidos

resultados e proceder a uma análise de sensibilidades das várias variáveis de alguns modelos matemáticos.

De seguida apresentam-se e descrevem-se as principais propriedades e parâmetros com influência nos diversos modelos de transporte estudados.

2.1. CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO E DO ESCOAMENTO

Nesta secção são apresentadas as principais propriedades dos fluidos e dos escoamentos existentes em canais, relevantes para o estudo do transporte sólido. Desta forma, pretende-se definir os valores mais usuais utilizados na caracterização dos fluidos e escoamentos em trabalhos de hidráulica fluvial.

2.1.1. ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE

A aceleração da gravidade (g) num ponto é a intensidade que o campo gravitacional exerce nesse ponto. Na hidráulica fluvial geralmente considera-se que a aceleração da gravidade ao nível do mar e à latitude de 45° , é aproximadamente igual a 9.81 m/s^2 . O valor da aceleração da gravidade varia ligeiramente, principalmente devido a diferentes altitudes e variações na latitude (Wikipédia, 2007).

2.1.2. MASSA VOLÚMICA E PESO VOLÚMICO

A massa volúmica (ρ) e peso volúmico (γ) de uma substância são, respectivamente, a massa e o peso da unidade de volume dessa substância. Para os líquidos estas grandezas variam com a pressão e a temperatura (Ramísio, 2005).

Tabela 1 - Variação da massa volúmica da água (ρ) em função da temperatura (Netto *et al.*, 1998).

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	0	2	4	5	20	40	60	100
Massa volúmica (kg/m^3)	999.87	999.97	1000.00	999.99	998.23	992.24	983.00	958.00

Como se verifica na Tabela 1, à pressão atmosférica normal, a água apresenta o valor máximo de massa volúmica à temperatura de 4°C , com o valor de 1000 kg/m^3 . Considerando a aceleração da gravidade igual a 9.8 m/s^2 , o peso volúmico, à mesma temperatura será de 9800 N/m^3 (Ramísio, 2005).

2.1.3. VISCOSIDADE

A viscosidade (ν) é a resistência do fluido à deformação. Quando se dá o escoamento de um fluido há um movimento relativo das suas partículas que suscita um atrito interno entre as mesmas. É este atrito interno que se designa por viscosidade, estando esta directamente relacionada com a coesão entre as partículas do fluido (UM, 2007).

Tabela 2 - Variação da viscosidade (ν) em função da temperatura (Netto *et al.*, 1998).

Temperatura (°C)	0	2	4	10	15	20	30	100
Viscosidade ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	1.792	1.673	1.567	1.308	1.146	1.007	0.804	0.296

A viscosidade diminui com a temperatura quando o fluido é líquido e aumenta quando é gasoso, como se pode verificar na Tabela 2. Esta propriedade é necessária na caracterização de diversas variáveis relacionadas com o cálculo do transporte sedimentar (UM, 2007).

2.2. PROPRIEDADES DOS SEDIMENTOS

As propriedades dos sedimentos desempenham um papel decisivo nos processos de erosão das encostas, transporte de materiais erodidos e sua deposição em lagos e albufeiras. Nos sedimentos, convém distinguir entre as propriedades das partículas consideradas individualmente (grãos) e as propriedades das misturas (Cardoso, 1998).

2.2.1. DIMENSÃO

Devido à irregularidade das formas das partículas sedimentares, existem dificuldades na definição da dimensão dos grãos existentes nos leitos aluvionares. Podem ser definidos quanto ao diâmetro nominal que corresponde ao diâmetro de uma esfera de densidade e volume iguais aos da partícula, pelo diâmetro de sedimentação, correspondente a uma esfera de igual densidade, que no mesmo fluido apresenta uma velocidade de queda igual à da partícula, ou pelo diâmetro de peneiração, que é a definição mais usual, que corresponde ao diâmetro de uma esfera que, como a partícula, passa sem folga pelo quadrado interior da rede de um peneiro (Cardoso, 1998).

As partículas sedimentares podem ser classificadas em função das respectivas dimensões. Na Tabela 3 encontram-se as designações de cada classe de sedimentos consoante os limites de separação, conforme o diâmetro de peneiração.

2. Métodos de estimativa de caudais sólidos

Tabela 3 - Classificação das partículas sedimentares segundo o diâmetro de peneiração (Cardoso, 1998).

Classe	Gama de diâmetros de peneiração
Argila	0.24 μm a 4 μm
Silte	4 μm a 62 μm
Areia	62 μm a 2 mm
Seixo	2 mm a 64 mm
Calhau	> 64 mm

Os materiais mais comuns nos cursos de água são a areia e os seixos, que apresentam diâmetros respectivamente, entre 62 μm e 2 mm e entre 2 mm e 64 mm (Cardoso, 1998).

O mais útil e conveniente método para a análise do tamanho das partículas é a utilização da curva de distribuição granulométrica. A partir desta curva, é possível retirar os vários diâmetros de peneiração, que correspondem ao diâmetro de peneiração tal que n% em peso é mais fino, como se pode observar na Figura 1 (Liu, 2001).

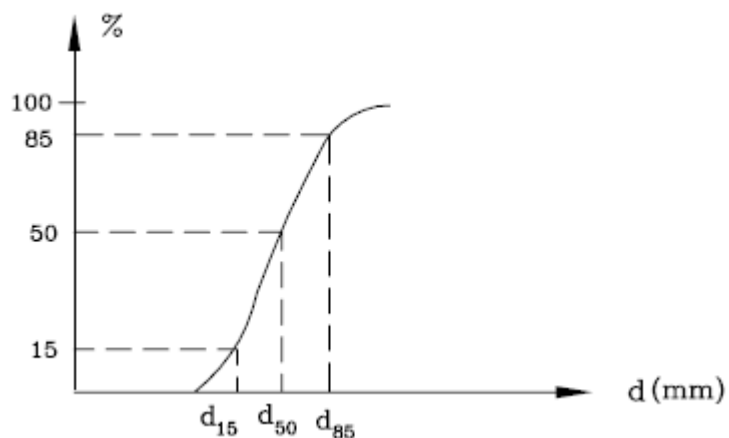


Figura 1 - Distribuição granulométrica dos sedimentos (Liu, 2001).

2.2.2. DENSIDADE

A densidade (s) das partículas sedimentares varia com a composição mineralógica. A composição dos sedimentos originados pela erosão hídrica é geralmente de quartzo e feldspato, com densidade usual de cerca de 2.65. Em zonas vulcânicas os materiais sedimentares são, por exemplo constituídos por pedra-pomes, originando densidades significativamente inferiores, com valores entre 1.35 e 1.70 (Cardoso, 1998).

2.2.3. FORMA

A forma das partículas sedimentares reveste-se de importância por influenciar a sua velocidade de transporte nos leitos fluviais, a velocidade de queda, a estabilidade dos taludes e o próprio caudal sólido (Cardoso, 1998).

A esfericidade é um dos parâmetros de forma de maior relevância, definida como a razão entre a área da superfície de uma esfera de volume igual ao de uma partícula e a área da superfície dessa partícula. Para partículas esféricas, a esfericidade é 1.0 e para todas as outras a esfericidade é inferior. O valor habitual para a forma dos sedimentos correspondente a areias naturais é de 0.7 (Chang, 1998).

2.2.4. POROSIDADE

A porosidade (v) define a percentagem de vazios num dado volume de sedimentos secos. Depende da distribuição granulométrica, da forma das partículas e da sua arrumação. Pode ser distinguida a porosidade total da porosidade efectiva. A primeira refere-se a todos os vazios, incluindo os que possam existir no interior dos próprios grãos, enquanto a segunda considera apenas os vazios interligados de forma a constituir canalículos (Cardoso, 1998).

Em geral, os sedimentos finos são mais porosos que os grosseiros. A porosidade efectiva da areia grosseira será de 39% a 41%, a da areia média tem valores entre 41% e 48% e a da areia fina entre 44% e 49%.

2.2.5. PESO VOLÚMICO

O peso volúmico de um grão (γ_s) pode ser definido como o produto da sua densidade pelo peso volúmico da água (9.81 kN/m^3). O peso volúmico aparente seco (γ_a) de uma mistura granulométrica representa o peso seco por unidade de volume da mistura (Cardoso, 1998).

O peso volúmico de uma mistura está relacionado com grau de consolidação, que depende do tempo decorrido desde a sedimentação e da granulometria dos materiais. De um modo geral, os materiais finos têm um peso volúmico inicial relativamente baixo mas como estão sujeitos a consolidação podem, depois de consolidados, apresentar pesos volúmcicos muito mais elevados. Os materiais grosseiros, em geral, têm um peso volúmico inicial mais elevado, que estabiliza rapidamente em valores próximos do inicial por serem pouco susceptíveis à consolidação (Cardoso, 1998).

2. Métodos de estimativa de caudais sólidos

No caso das areias, como referência, podem apresentar-se os valores indicados na Tabela 4 para o peso volúmico aparente seco, em função da granulometria.

Tabela 4 - Peso volúmico aparente seco da areia em função da granulometria (Cardoso, 1998).

Areia	Gama de diâmetros	γ_a (kN/m ³)
Muito fina	62 μ m a 0.125 mm	12.6
Fina	0.125 mm a 0.25 mm	14.4
Média	0.25 mm a 0.50 mm	14.9
Grosseira	0.50 mm a 1.0 mm	15.0
Muito grosseira	1.0 mm a 2.0 mm	15.5

2.2.6. ÂNGULO DE ATRITO INTERNO

O ângulo de atrito das partículas é o ângulo cuja tangente é igual à razão entre forças tangenciais e normais numa situação de deslizamento iminente de uma camada de sedimentos sobre a outra (Cardoso, 1998).

Na hidráulica fluvial considera-se que as forças de contacto entre grãos são relativamente fracas e o ângulo de atrito interno coincide com o ângulo de repouso ou ângulo de talude natural. O ângulo de talude natural é o maior ângulo com a horizontal que pode ser formado pela superfície inclinada constituída por sedimentos (Cardoso, 1998).

2.3. CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS

O início do movimento incipiente das partículas pode ser definido por condições de tensão crítica de arrastamento ou velocidade média crítica. Os métodos de previsão do movimento incipiente que se baseiam no conceito de tensão crítica são mais racionais e os mais utilizados, enquanto os que se baseiam no conceito da velocidade média crítica são mais simples e uso comum no dimensionamento de enrocamentos e na modelação matemática de fenómenos de transporte sólido (Cardoso, 1998).

2.3.1. TENSÃO CRÍTICA DE ARRASTAMENTO

A caracterização do movimento incipiente com base no conceito da tensão crítica de arrastamento, considera que as partículas da superfície do fundo de um canal estão sujeitas à acção de forças hidrodinâmicas devido ao escoamento e de forças resistentes devido ao peso submerso das partículas. Desta forma, uma partícula entra em movimento quando as acções solicitadoras superam as acções resistentes. Na situação crítica ou de movimento incipiente as acções, solicitadoras e resistentes que actuam numa partícula são praticamente iguais, mantendo o equilíbrio estático (Cardoso, 1998).

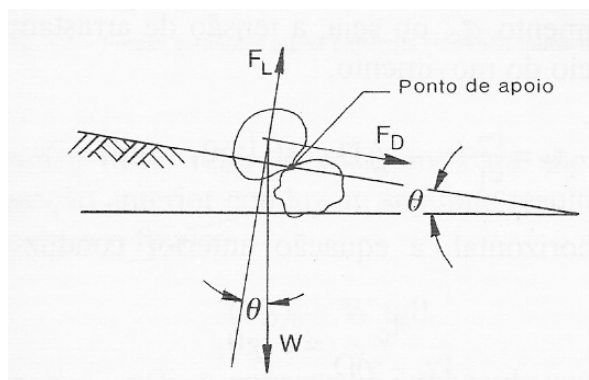


Figura 2 - Esquema de forças actuantes sobre uma partícula (Cardoso, 1998).

Analisando a Figura 2, considera-se que as solicitações sobre a partícula de diâmetro D são dadas pela força de arrastamento F_D , que actua na direcção e sentido do escoamento, e pela sustentação hidrodinâmica F_L , normal a F_D . A única acção resistente existente é o peso submerso W , com direcção da aceleração gravítica. No entanto, a força de sustentação hidrodinâmica F_D , não é directamente considerada, pelo facto de ser difícil de quantificar. Como a sustentação e o arrastamento não são independentes, os efeitos da sustentação são considerados, indirectamente, através de coeficientes contemplados no arrastamento (Cardoso, 1998).

A força de arrastamento, F_D , relaciona-se com a tensão de arrastamento τ_0 e exprime-se pela seguinte equação:

$$F_D = c_1 \tau_0 D^2 \quad (1)$$

O peso submerso, W , depende do peso volúmico dos sedimentos e da água, de acordo com a equação (2):

$$W = c_2 (\gamma_s - \gamma) D^3 \quad (2)$$

2. Métodos de estimativa de caudais sólidos

O equilíbrio de forças na situação de movimento incipiente traduz-se na seguinte igualdade:

$$W \cos(\theta) \tan(\theta_r) = F_D + W \sin(\theta) \quad (3)$$

Substituído F_D e W pelas respectivas expressões (1) e (2), obtém-se a tensão crítica de arrastamento τ_c , ou seja, a tensão de arrastamento para as condições de início de movimento:

$$\tau_c = \frac{c_2}{c_1} (\gamma_s - \gamma) D \cos(\theta) [\tan(\theta_r) - \tan(\theta)] \quad (4)$$

Para leitos horizontais ($\theta = 0$), a equação anterior toma a forma simplificada:

$$\tau_c = c (\gamma_s - \gamma) D \tan(\theta_r) \quad (5)$$

Nas últimas décadas têm sido feitas tentativas para identificar a relação entre a tensão crítica de arrastamento, com as propriedades dos materiais do fundo e do fluido do escoamento. Existem diversos métodos que permitem determinar a tensão crítica de arrastamento, em função das propriedades dos materiais do fundo e das características do fluido (Cardoso, 1998).

Schoklisch apresentou a equação (6), que depende do factor de forma dos sedimentos (η), que varia entre 1.0 para esferas e 4.4 para rocha lascada.

$$\tau_c = \sqrt{0.201 \gamma_s (\gamma_s - \gamma) \eta D^3} \quad (6)$$

Lane, em 1955, deduziu a equação (7) para aplicação no dimensionamento de canais sem transporte sólido com o fundo constituído por materiais não coesivos. Na equação, D_{75} é expresso em milímetros e a tensão crítica de arrastamento resulta em N/m^2 . Esta expressão não deve ser utilizada para valores de D_{50} inferiores a 2 mm.

$$\tau_c = 0.785 D_{75} \quad (7)$$

O Highway Research Board, em 1970, apresenta a equação (8) para o cálculo da tensão crítica, com base no diâmetro médio das partículas. Nesta equação, D_{50} também é expresso em milímetros e a tensão crítica de arrastamento resulta em N/m^2 .

$$\tau_c = 0.628 D_{50} \quad (8)$$

DuBoys, em 1879, apresenta a expressão (9) para determinar a tensão crítica, baseada nas experimentações obtidas por Straub em laboratório.

$$\tau_c = 0.6 + 0.91D_{50} \quad (9)$$

Van Rijn, em 1984, deduziu a expressão (10) para o cálculo da tensão crítica, tendo em conta o valor crítico do parâmetro de Shields (Y_{cr}).

$$\tau_c = Y_{cr} (\gamma_s - \gamma) D_{50} \quad (10)$$

Conhecida a tensão crítica de arrastamento, é necessário avaliar a tensão tangencial na direcção do escoamento, que aumenta linearmente com o acréscimo da distância à superfície e é máxima junto ao fundo, sendo designada por tensão de arrastamento τ_0 . Esta tensão relaciona-se com o peso volumico do fluido (γ), com o raio hidráulico (R), e com o declive da linha de energia (J) que normalmente se considera igual ao declive do fundo (i) para canais pouco inclinados. A tensão de arrastamento é determinada pela expressão (11) (Cardoso, 1998).

$$\tau_0 = \gamma R J = \rho g R J \quad (11)$$

O início do movimento incipiente das partículas ocorre quando a tensão crítica de arrastamento τ_c é inferior à tensão de arrastamento τ_0 .

2.3.2. VELOCIDADE CRÍTICA

A caracterização do movimento incipiente com base no conceito da velocidade crítica, utilizado pela primeira vez por DuBoy para caracterizar o início do movimento, permite determinar a máxima velocidade média do escoamento que não provoca o transporte sólido (Cardoso, 1998).

A velocidade média crítica (U_{cr}) é a máxima velocidade média do escoamento que não provoca erosão do fundo nem das margens. Este conceito é já muito antigo e até ao presente muitos critérios e fórmulas foram propostos com vista à determinação da velocidade média crítica. Na generalidade, estes critérios são aplicáveis para fundos de granulometria uniformes. Na prática considera-se que o diâmetro característico das partículas é o diâmetro médio (Cardoso, 1998).

Existem vários métodos que permitem conhecer a velocidade média crítica, aplicada a fundos de granulometria uniforme e considerando o diâmetro médio de peneiração.

Goncharov, em 1964, determinou que para escoamentos turbulentos rugosos a velocidade média crítica é dada pela expressão (12) (Cardoso, 1998).

$$U_{cr} = \log(8.8Z) \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)D}{3.5\gamma}} \quad (12)$$

Neil, em 1967, propôs a fórmula (13) de cálculo da velocidade média crítica (Cardoso, 1998).

$$U_{cr} = \sqrt{2.5Z^{0.2} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D_{50}} \quad (13)$$

Grade, em 1970, apresentou o seguinte critério (Cardoso, 1998).

$$U_{cr} = [0.50 \log(Z) + 1.63] \sqrt{\frac{(\gamma_s - \gamma) D_{50}}{\rho}} \quad (14)$$

As expressões (12), (13) e (14) estão dependentes da submersão relativa (Z). Este coeficiente é determinado a partir da razão entre a altura do escoamento e a dimensão média dos sedimentos, considerando $Z = h/D_{50}$ (Cardoso, 1998).

Van Rijn, definiu que a velocidade média crítica pode ser obtida por aplicação das expressões (15). Este método apresenta um campo de aplicação para dimensões média dos sedimentos (D_{50}) compreendido entre 0.1 mm e 2.0 mm (Coelho *et al.*, 2007).

$$\begin{aligned} U_{cr} &= 0.19 D_{50}^{0.1} \log \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) & \text{se } 0.1 \leq D_{50} \leq 0.5 \text{ mm} \\ U_{cr} &= 8.50 D_{50}^{0.6} \log \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) & \text{se } 0.5 < D_{50} \leq 2.0 \text{ mm} \end{aligned} \quad (15)$$

Considera-se que o transporte sedimentar junto ao fundo só ocorre quando a velocidade média do escoamento (U) exceder a velocidade média crítica (U_{cr}).

2.4. PARÂMETROS DE CÁLCULO

Na estimativa do transporte sólido são utilizadas metodologias de cálculo que recorrem frequentemente a alguns parâmetros como a velocidade de queda das partículas e da concentração de referência, coeficiente de arrastamento, entre outros, pelo que seguidamente se apresentam algumas das propostas de determinação destas propriedades.

2.4.1. COEFICIENTE DE ARRASTAMENTO

O coeficiente de arrastamento traduz a relação entre as tensões de atrito no fundo e a velocidade média do escoamento. Este coeficiente pode ser obtido segundo diferentes vias. As expressões que se seguem resumem algumas alternativas de cálculo deste parâmetro (Soulsby, 1997).

$$C_d = \alpha \left(\frac{z_0}{h} \right)^\beta \quad (16)$$

Os coeficientes α e β da equação (16) podem assumir diferentes valores consoante a proposta de cálculo adoptada. Na Tabela 5 encontram-se algumas dessas propostas apresentados por diversos autores.

Tabela 5 - Coeficientes α e β para determinação do coeficiente de arrastamento (Soulsby, 1997).

Método	α	β
Manning-Strickler	0.0474	1/3
Dawson-Johns	0.0190	0.208
Soulsby	0.0415	2/7

Outro método para determinar o valor do coeficiente de arrastamento consiste na fórmula logarítmica (17). Nesta expressão, o coeficiente B toma o valor 1.0. κ representa a constante de Van Karman e vale 0.40 (Soulsby, 1997).

$$C_d = \left[\frac{\kappa}{B + \ln \left(\frac{z_0}{h} \right)} \right]^2 \quad (17)$$

Analisando as expressões (16) e (17), verifica-se que para um aumento da profundidade, a relação entre z_0 e h diminui, e o coeficiente de arrastamento C_d também diminui.

2.4.2. RUGOSIDADE RELATIVA DO FUNDO

A rugosidade relativa do fundo (z_0) é um parâmetro importante na determinação do coeficiente de arrastamento, que está dependente da viscosidade da água, da velocidade do escoamento e das

2. Métodos de estimativa de caudais sólidos

dimensões da rugosidade do fundo. Este parâmetro pode ser obtido através da expressão (18), apresentada por Christoffersen e Jonsson em 1985 (Soulsby, 1997).

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \left[1 - \exp\left(\frac{-u_* k_s}{27 \nu}\right) \right] + \frac{\nu}{9u_*} \quad (18)$$

Na expressão (18), u_* representa a velocidade de atrito junto ao fundo e k_s a rugosidade de Nikuradse. Esta expressão deve ser aplicada numa situação de transição ($5 \leq u_* k_s / \nu \leq 70$) entre escoamento turbulento e laminar. No entanto, esta expressão pode assumir formas mais simplificadas consoante o tipo de escoamento, de acordo com Soulsby (1997).

Para escoamentos hidrodinâmicos turbulentos ($u_* k_s / \nu > 70$) a equação (18) pode ser simplificada, resultando na expressão (19).

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \quad (19)$$

Para escoamentos laminares ($u_* k_s / \nu < 5$) a equação (18) adquire uma forma apresentada na expressão (20).

$$z_0 = \frac{\nu}{9u_*} \quad (20)$$

Colebrook e White, em 1937, apresentaram uma expressão bastante mais simplificada, mas menos precisa, para a determinação da rugosidade do fundo, expressa pela equação (21) (Soulsby, 1997).

$$z_0 = \frac{k_s}{30} + \frac{\nu}{9u_*} \quad (21)$$

Normalmente, as lamas e areias finas correspondem a escoamentos laminares ou transitórios, enquanto as areias grossas e cascalhos enquadram-se em escoamentos turbulentos. É prática comum o tratamento de todos os escoamentos sobre leitos de areias como sendo turbulentos, de forma a simplificar os cálculos. Esta simplificação está associada a um erro inferior a 10% (Soulsby, 1997).

A rugosidade de Nikuradse (k_s) pode ser determinada segundo várias propostas, a partir da dimensão dos sedimentos. Sleath (1984) e Van Rijn (1993) listaram algumas alternativas possíveis para determinação deste parâmetro: $k_s = 1.25D_{35}$, $k_s = 1.0D_{65}$, $k_s = 2.3D_{84}$; $k_s = 5.1D_{84}$, $k_s = 2D_{90}$,

$k_s = 3D_{90}$. Como se pode verificar, não existe um consenso da melhor alternativa para a determinação da rugosidade de Nikuradse (Soulsby, 1997).

Já em 1990, através de medições experimentais, Soulsby e Humphery, determinaram que a rugosidade de Nikuradse podia ser expressa por $2.4D_{50}$ ou $1.11D_{90}$ e a partir dessas considerações obtiveram a expressão (22) (Soulsby, 1997).

$$k_s = 2.5D_{50} \quad (22)$$

A rugosidade relativa para escoamentos turbulentos pode ser determinada pela expressão (23), que resulta da combinação das equações (19) e (22), definindo z_0 a partir da dimensão média dos sedimentos (Soulsby, 1997).

$$z_0 = \frac{D_{50}}{12} \quad (23)$$

Tabela 6 - Valores médios da rugosidade relativa (z_0) para diferentes tipos de sedimentos do fundo (Soulsby, 1997).

Tipo de sedimentos do fundo	z_0 (mm)
Lodo	0.20
Lodo / Areia	0.70
Silte / Areia	0.05
Areia (fundo liso)	0.40
Areia (fundo rugoso)	6.00
Areia / Cascalho	0.30
Lodo / Areia / Cascalho	0.30
Cascalho	3.00

Naturalmente, a granulometria dos sedimentos por vezes pode apresentar misturas complexas, pelo que nesses casos pode-se recorrer à Tabela 6 para determinar a rugosidade relativa. Os valores apresentados foram obtidos através de um grande número de medições experimentais efectuadas por Soulsby (1983).

2.4.3. VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS

Uma partícula em queda num meio líquido em repouso é solicitada pelo seu peso submerso (peso subtraído da impulsão) e pela força de arrastamento ou resistente, Figura 3. A velocidade de queda das partículas corresponde ao valor constante da velocidade adquirida pelas partículas quando o somatório das forças que lhes estão aplicadas é igual a zero (Liu, 2001).

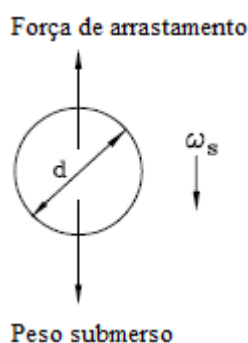


Figura 3 - Esquema de forças actuantes sobre uma partícula em suspensão (Liu, 2001).

Na aplicação de modelos de cálculo de transporte sólido, a caracterização da velocidade de queda das partículas (w_s) é fundamental para a determinação do transporte de carga em suspensão, mas não tem influência nos resultados da carga transportada junto ao fundo. A velocidade de sedimentação de uma partícula é função de vários parâmetros, como da densidade e diâmetro das partículas e da densidade e viscosidade do fluido (Almeida *et al.*, 2007).

Em termos práticos, a velocidade de queda ou de sedimentação é normalmente referida à dimensão das partículas em suspensão e não à dimensão das partículas do fundo. Esta constatação significa que existe uma redução das dimensões das partículas em relação às partículas presentes no fundo, pois são normalmente as partículas de menor dimensão e peso que se encontram em suspensão (Junior e Martins, 1993).

A velocidade de queda depende ainda da existência de outras partículas em queda, da concentração de sedimentos em suspensão, da turbulência do escoamento e das dimensões da bacia de sedimentação. Quando existem duas ou mais partículas em sedimentação há interações entre estas, aumentando a velocidade de queda das partículas quando um número reduzido de partículas se aproximam. Porém se o número de partículas aumentar significativamente, a resistência aumenta e a velocidade de queda diminui. Nas argilas, as forças electromagnéticas que se desenvolvem tendem a fazer flocular as partículas, adquirindo velocidades de queda superiores às das partículas isoladas (Cardoso, 1998).

Existem vários métodos de cálculo da velocidade de queda das partículas, pelo que alguns desses métodos são apresentados de seguida, que se encontram referidos em Soulsby (1997).

Fórmula de Gibbs *et al.*, de 1971, para esferas.

$$w_s = \frac{\left[9v^2 + gD_s^2(s-1)(3.869 \times 10^{-3} + 0.024801D_s)\right]^{1/2} - 3v}{0.011607 + 0.074405D_s} \quad (24)$$

Fórmula de Hallermeier, de 1981, para areias naturais com factores de forma variáveis.

$$\begin{aligned} w_s &= \frac{vD_{*s}^3}{18D_s} & \text{se } D_{*s}^3 \leq 39 \\ w_s &= \frac{vD_{*s}^{2.1}}{6D_s} & \text{se } 39 < D_{*s}^3 < 10^4 \\ w_s &= \frac{1.05vD_{*s}^{1.5}}{D_s} & \text{se } 10^4 \leq D_{*s}^3 < 3 \times 10^6 \end{aligned} \quad (25)$$

Fórmula de Van Rijn, de 1984, para areias naturais com factores de forma variáveis.

$$\begin{aligned} w_s &= \frac{vD_{*s}^3}{18D_s} & \text{se } D_{*s}^3 \leq 16.187 \\ w_s &= \frac{10v}{D_s} \left[\left(1 + 0.01D_{*s}^3\right)^{1/2} - 1 \right] & \text{se } 16.187 < D_{*s}^3 \leq 16187 \\ w_s &= \frac{1.1vD_{*s}^{1.5}}{D_s} & \text{se } D_{*s}^3 > 16187 \end{aligned} \quad (26)$$

Fórmula de Soulsby, de 1997, para areias naturais com factores de forma variáveis.

$$w_s = \frac{v}{D_s} \left[\left(10.36^2 + 1.049D_{*s}^3\right)^{1/2} - 10.36 \right] \quad (27)$$

2.4.4. CONCENTRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DISTÂNCIA AO FUNDO

A concentração de partículas em suspensão num fluido ao longo da altura do escoamento, aumenta da superfície para o fundo e depende essencialmente dos efeitos das forças verticais devido a fenómenos de turbulência e da força da gravidade, que actuam nas partículas (Soulsby, 1997).

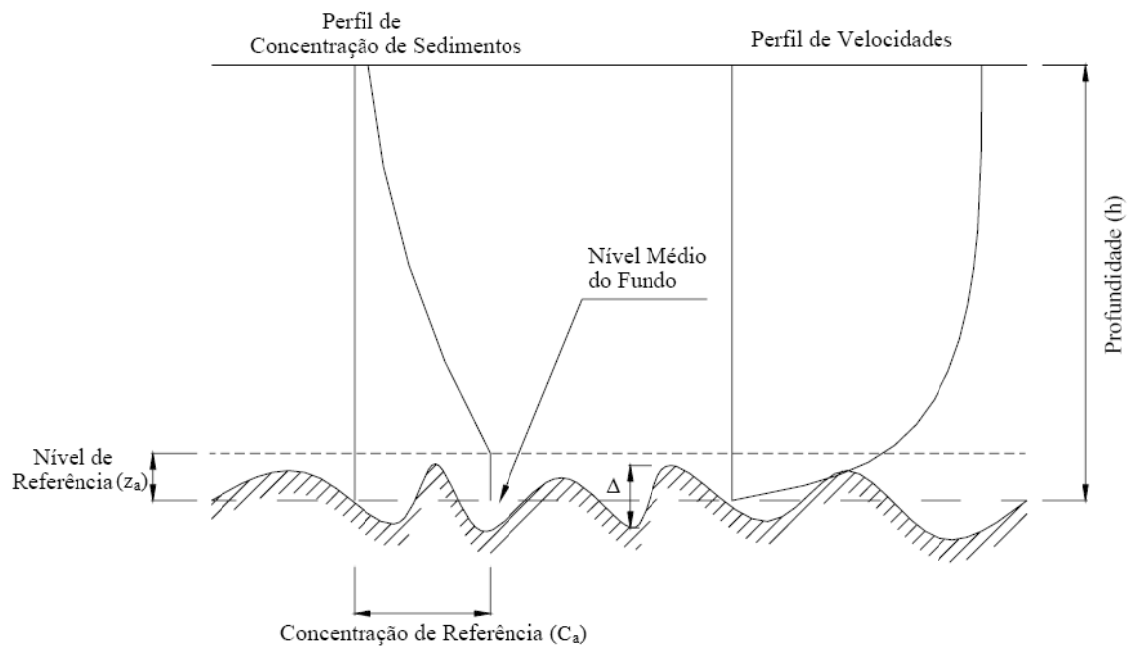


Figura 4 - Variação da concentração de sedimentos e da velocidade do escoamento em profundidade (Coelho, 2006).

A concentração de referência e a distância ao fundo podem ser obtidas por várias metodologias seguindo as propostas definidas por diversos autores. De seguida são apresentadas algumas dessas propostas, de acordo com Soulsby (1997).

Smith e McLean, em 1977, propuseram as expressões (28) e (29) para o cálculo da concentração de referência (C_a) e da distância ao fundo (z_a).

$$C_a = \frac{0.00156T}{1 + 0.0024T} \quad (28)$$

$$z_a = \frac{26.3 \tau_c T}{\rho g(s-1)} + \frac{D_{50}}{12} \quad (29)$$

Van Rijn, em 1984, refere que a concentração de referência (C_a) deve ser avaliada à distância (z_a) do fundo. No caso de se conhecer a configuração do fundo, esta distância deve ser estimada em função da altura da forma do fundo (Δ), caso contrário pode ser obtida em função da rugosidade dos grãos (k).

$$C_a = \frac{0.015 D_{50} T^{3/2}}{z_a D_*^{0.3}} \quad (30)$$

$$z_a = \Delta/2 \text{ ou } z_a = k = 3D_{90} \text{ com } z_a \geq 0.01h \quad (31)$$

Zyserman e Fredsøe, em 1994, apresentam uma fórmula para avaliar a distância (z_a) do fundo para a qual é determinada a concentração de referência (C_a), como sendo o dobro da dimensão média dos sedimentos.

$$C_a = \frac{0.331(Y - 0.045)^{1.75}}{1 + 0.72(Y - 0.045)^{1.75}} \quad (32)$$

$$z_a = 2D_{50} \quad (33)$$

2.4.5. VELOCIDADE DE ATRITO

A velocidade de atrito junto ao fundo está associada às características geométricas da secção de escoamento e é obtida a partir da equação (34) (CCDRC, 2002).

$$u_* = \sqrt{\frac{\gamma R J}{\rho}} = \sqrt{g R i} \quad (34)$$

A velocidade de atrito junto ao fundo associada ao escoamento sobre leito plano (u'_*) é calculada em função da correspondente parcela do coeficiente de Chézy (C') devido à resistência ao escoamento conferida pela rugosidade do grão (k') (CCDRC, 2002).

$$u'_* = \sqrt{g} \frac{U}{C'} \quad (35)$$

Segundo Van Rijn a parcela do coeficiente de Chézy (C') associada à rugosidade do grão (k') é determinada pela expressão (36) (CCDRC, 2002).

$$C' = 18 \log \left(\frac{12R}{k'} \right) \quad (36)$$

Van Rijn concluiu que se pode estimar a parcela da rugosidade equivalente de Nikuradse atribuível às configurações de fundo (k'), com relativo rigor através da equação (37) (CCDRC, 2002).

$$k' = 3D_{90} \quad (37)$$

Van Rijn forneceu a expressão analítica (38) para o cálculo da velocidade de atrito junto ao fundo correspondente o início do fenómeno de transporte sólido (CCDRC, 2002).

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{Y_{cr} \gamma'_s D_{50}}{\rho}} \quad (38)$$

2.4.6. PARÂMETRO DE SHIELDS

O parâmetro de Shields (Y) traduz a influência do peso volúmico do grão do material submerso (γ'_s), caracterizando a relação entre a força de atrito do fluido sobre o grão e o peso desse grão (Cardoso, 1998).

$$Y = \frac{\tau_0}{g \rho (s - 1) D_{50}} \quad (39)$$

O valor crítico do parâmetro de Shields (Y_{cr}) pode ser determinado com recurso às expressões (40) que dependem essencialmente do diâmetro adimensional do material do fundo (Cardoso, 1998).

$$\begin{aligned} Y_{cr} &= 0.24(D_*)^{-1} && \text{se } D_* \leq 4 \\ Y_{cr} &= 0.14(D_*)^{-0.64} && \text{se } 4 < D_* \leq 10 \\ Y_{cr} &= 0.04(D_*)^{-0.1} && \text{se } 10 < D_* \leq 20 \\ Y_{cr} &= 0.013(D_*)^{0.29} && \text{se } 20 < D_* \leq 150 \\ Y_{cr} &= 0.055 && \text{se } D_* > 150 \end{aligned} \quad (40)$$

Soulsby e Whitehouse (1997) propuseram a expressão algébrica (41), que se aproxima do traçado de Shields e é função do parâmetro adimensional de dimensão dos grãos (Soulsby, 1997).

$$Y_{cr} = \frac{0.24}{D_*} + 0.055 [1 - \exp(-0.02D_*)] \quad (41)$$

No entanto, essencialmente para baixos valores de D_* não existe uma boa concordância de valores e como Bagnold, por considerações de forças concluiu que o parâmetro de Shields não pode exceder o valor de 0.30, surge uma segunda proposta de Soulsby e Whitehouse (1997), com bons resultados, correspondente à equação (42) (Soulsby, 1997).

$$Y_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055 [1 - \exp(-0.02D_*)] \quad (42)$$

2.4.7. DIÂMETRO ADIMENSIONAL DO MATERIAL DO FUNDO

A caracterização do tamanho das partículas de uma mistura num fluido pode ser definida pelo parâmetro adimensional de dimensão dos grãos (D_*), que depende não só da própria dimensão das partículas, mas também reflecte a influência da sua densidade e de características do fluido onde se encontra. Este parâmetro é obtido por aplicação da expressão (43) (Cardoso, 1998).

$$D_* = D \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (43)$$

2.4.8. DIÂMETRO REPRESENTATIVO DO MATERIAL TRANSPORTADO EM SUSPENSÃO

Usualmente, as partículas transportadas em suspensão são consideravelmente menores que aquelas transportadas junto ao fundo. O diâmetro destas partículas pode ser determinado a partir do diâmetro representativo do material transportado em suspensão (D_s), dado pela expressão (44) (Junior e Martins, 1993).

$$D_s = (1 + 0.011(\sigma_d - 1)(T - 25))D_{50} \quad (44)$$

Na equação (44), o coeficiente de graduação (σ_d) é o indicador da aproximação da curva granulométrica a uma distribuição log-normal, ou seja, representa o desvio-padrão da curva de distribuição granulométrica que caracteriza a mistura de sedimentos (Cardoso, 1998).

$$\sigma_d = 0.5 \left(\frac{D_{84.1}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{15.9}} \right) \quad (45)$$

2.4.9. PARÂMETRO ADIMENSIONAL DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE

Parâmetro adimensional de capacidade de transporte, definido por Van Rijn, apresenta uma grande importância nos fenómenos de transporte e pode ser obtido por aplicação das equações (46) (Cardoso, 1998).

$$T = \frac{\tau'_0 - \tau_c}{\tau_c} = \frac{(u'_*)^2 - (u_{*c})^2}{(u_{*c})^2} \quad \text{para } 0 < T < 25 \quad (46)$$

Estes limites de aplicação influem directamente em diversos parâmetros do transporte sólido. Quando este parâmetro apresenta um valor inferior a zero ($T < 0$), isto indica que não existe

movimento das partículas. Por outro lado, quando se obtêm valores superiores ao limite máximo ($T > 25$), este parâmetro não é limitativo do caudal sólido transportado, no entanto podem surgir situações ambíguas.

2.4.10. ALTURA DA FORMA DO FUNDO

Uma vez iniciado o transporte sólido por arrastamento, o escoamento da água sobre um fundo móvel interage com este, modelando-o e dando origem a diferentes configurações do fundo. A natureza das interações entre o fundo e o fluido e as configurações que daí resultam dependem da velocidade, profundidade do escoamento, das propriedades do fluido e do material granular do fundo. Segundo Soulsby (1997), para a altura das formas do fundo (Δ) deverão ser adoptados as seguintes metodologias.

Proposta de Yalin, em 1964:

$$\begin{aligned} \Delta &= 0 & \text{se } \tau_0 < \tau_c \\ \Delta &= \frac{h}{6} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) & \text{se } \tau_c < \tau_0 < 17.6\tau_c \\ \Delta &= 0 & \text{se } \tau_0 > 17.6\tau_c \end{aligned} \quad (47)$$

Proposta de Van Rijn, em 1984:

$$\begin{aligned} \Delta &= 0 & \text{se } \tau_0 < \tau_c \\ \Delta &= 0.11h \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0.3} (1 - \exp(-0.5T)) (25 - T) & \text{se } \tau_c < \tau_0 < 26\tau_c \\ \Delta &= 0 & \text{se } \tau_0 > 26\tau_c \end{aligned} \quad (48)$$

2.5. TRANSPORTE SÓLIDO

Iniciado o movimento do material sólido, o aumento sucessivo da capacidade de transporte faz com que um volume crescente de partículas role e escorreguem umas sobre as outras, até que algumas passem a deslocar-se por pequenos saltos, alternados com o repouso ou movimentos em contacto com o fundo, em que as partículas mais finas podem permanecer em suspensão devido à turbulência, sendo transportados no seio do escoamento. Desta forma, por ordem decrescente da dimensão das partículas, ocorre simultaneamente transporte sólido por arrastamento, transporte sólido por saltação e transporte sólido em suspensão (Cardoso, 1998).

As proporções relativas do material sólido transportado sob ambas as formas variam com a distância à nascente dos cursos de água. Nos troços iniciais, o relevo mais acentuado permite deslocar partículas de maiores dimensões, por sua vez, ainda não tendo ocorrido desgaste de sedimentos por transporte, predominam as partículas de maior dimensão e consequentemente o transporte por arrastamento. Nos troços finais, as partículas de menor dimensão tendem a predominar e consequentemente predomina também o transporte em suspensão (Lencastre e Franco, 1992).

Contudo, não é fácil estabelecer a distinção entre transporte sólido em suspensão, saltação e arrastamento, considerando-se então o caudal sólido por saltação e por arrastamento como uma única contribuição no transporte sólido. Podem então ser considerados três métodos de cálculo, agrupados em fórmulas de determinação do caudal sólido por arrastamento, fórmulas de determinação do caudal sólido em suspensão e fórmulas de determinação do caudal sólido total (Cardoso, 1998).

2.5.1. TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTAMENTO

Os métodos de cálculo de transporte sólido por arrastamento foram inicialmente desenvolvidos na Europa Ocidental, onde muitos rios se caracterizam pelo transporte de material por arrastamento. Existem vários métodos que podem ser classificados de diferentes modos em função dos pressupostos seguidos, sendo que, a maioria recorre ao conceito da tensão de arrastamento para estimar o volume sólido transportado (Cardoso, 1998).

Algumas das fórmulas de cálculo do transporte sólido por arrastamento mais utilizadas, desenvolvidas principalmente para aplicação em rios, são apresentadas de seguida. Muitas dessas expressões resultam num parâmetro adimensional que pela aplicação da equação (49) resulta no caudal sólido transportado por arrastamento (Soulsby, 1997).

$$q_b = \Phi \left[g (s - 1) D^3 \right]^{1/2} \quad (49)$$

Meyer-Peter e Müller, em 1948, na sequência de extenso trabalho experimental, que englobou uma gama de valores com diferentes profundidades, inclinações, granulometrias e pesos volúmicos ($0.01 \text{ m} \leq h \leq 1.20 \text{ m}$, $0.004 \leq i = J \leq 0.02$, $0.4 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 30 \text{ mm}$ e $1.25 \leq s \leq 4.2$), propuseram a seguinte fórmula (Cardoso, 1998):

$$q_b = \frac{q'_{sp}}{(1 - v)(\gamma_s - \gamma)} \quad (50)$$

2. Métodos de estimativa de caudais sólidos

Onde q'_{sp} pode ser obtido de acordo com a expressão (51).

$$\left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} \gamma R J = 0.047 \gamma'_s D + 0.25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} (q'_{sp})^{2/3} \quad (51)$$

K_s e K_r representam a rugosidade referida ao escoamento e ao grão, respectivamente.

$$K_s = \frac{U}{R^{2/3} J^{1/2}} \quad (52)$$

$$K_r = \frac{1}{n'} \quad (53)$$

Na expressão (53), n' é o coeficiente de Manning considerando as diversas contribuições de Keulegan (1938 e 1949), de Lane e Carlson (1953) e de Meyer-Peter e Müller (1948), para areias não uniformes. Na equação que permite quantificar n' , D_{90} é o diâmetro de peneiração expresso em milímetros (mm) tal que 90% em peso é mais fina (Cardoso, 1998).

$$n' = \frac{(D_{90})^{1/6}}{26} \quad (54)$$

Einstein-Brown, em 1950, apresentaram uma expressão que resulta da fórmula apresentada por Einstein em 1942, que após revisão de vários autores, dos quais se destaca Brown, resulta na equação (55) (Cardoso, 1998).

$$q_b = \Phi \left[\gamma_s F_1 \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \right] \quad (55)$$

O parâmetro F_1 , que exprime a influência da velocidade de queda ou de sedimentação, é obtido por:

$$F_1 = \left[\frac{2}{3} + \frac{36 v^2}{g D_{50}^3 (s-1)} \right]^{0.5} - \left[\frac{36 v^2}{g D_{50}^3 (s-1)} \right]^{0.5} \quad (56)$$

Ainda na expressão (55) é necessário recorrer às seguintes definições dos parâmetros Φ e Ψ' :

$$\begin{aligned} \Phi &= 40 \left(\frac{1}{\Psi'} \right)^3 && \text{para } 1/\Psi' \geq 0.2 \\ \Phi &= 2.151 \exp(-0.319\Psi') && \text{para } 1/\Psi' < 0.2 \end{aligned} \quad (57)$$

$$\Psi' = \frac{(\gamma_s - \gamma) D_{50}}{\tau_0} \quad (58)$$

Yalin, em 1963, criou um método de cálculo, para rios, que permite calcular o volume de partículas transportadas por unidade de tempo e por largura de fundo, pela aplicação da expressão (59) (Soulsby, 1997).

$$\Phi = F_y Y^{1/2} (Y - Y_{cr}) \quad (59)$$

$$F_y = \frac{0.63}{Y_{cr}} \left[1 - \frac{1}{a T} \ln(1 + a T) \right] \quad (60)$$

$$a = 2.45 Y_{cr}^{0.5} s^{-0.4} \quad (61)$$

Ashida e Michiue em 1972, elaboraram uma fórmula, para canais estáveis, que permite calcular o volume de partículas transportadas por unidade de tempo e por largura de fundo (Soulsby, 1997).

$$\Phi = 17(Y^{1/2} - 0.7Y_{cr}^{1/2})(Y - Y_{cr}) \quad (62)$$

Wilson, em 1972, deduziu uma expressão que permite calcular o caudal sólido por arrastamento para situações em que o valor do parâmetro de Shields é bastante superior ao parâmetro crítico de Shields, ou seja, para $Y \gg Y_{cr}$ (Soulsby, 1997).

$$\Phi = 12Y^{3/2} \quad (63)$$

Parker *et al.* em 1982, desenvolveram um fórmula essencialmente para rios com fundo de granulometria superior, em que a camada superior do leito possui uma granulometria mais grosseira que as camadas subjacentes, sendo esta camada móvel apenas em cheias excepcionais. Baseados em dados de campo para granulometrias compreendidas entre $18 \text{ mm} < D_{50} < 28 \text{ mm}$, desenvolveram relações empíricas de transporte sólido para outras tantas fracções da curva granulométrica do material do fundo. Essas expressões empíricas foram reduzidas, de forma aproximada e por considerações de semelhança, chegando à expressão (64) (Cardoso, 1998).

$$q_b = W_* \frac{\sqrt{ghJ} hJ}{(s-1)} \quad (64)$$

O parâmetro de transporte sólido W_* pode tomar diferentes valores em função do parâmetro de escoamento v^* .

$$\begin{aligned} W_* &= 0.025 \exp(14.2(v^* - 1) - 9.28(v^* - 1)^2) & \text{se } 0.95 \leq v^* < 1.65 \\ W_* &= 11.2 \left(1 - \frac{0.822}{v^*}\right) & \text{se } v^* \geq 1.65 \end{aligned} \quad (65)$$

$$v^* = 11.43 \frac{hJ}{(s-1)D_{50}} \quad (66)$$

Van Rijn, em 1984, apresentou a fórmula (67) para o cálculo do caudal sólido por arrastamento, cuja derivação considerou a altura de saltação das partículas, a sua velocidade e a concentração do material transportado. Com base nas equações do movimento, determinou a altura de saltação e a velocidade das partículas, e recorreu a resultados experimentais para determinar a concentração dos sedimentos na camada de transporte por arrastamento, para $0.2 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$ (Cardoso, 1998).

$$q_b = \frac{0.05T^{2.1}}{D_*^{0.3}} [(s-1)g]^{0.5} D_{50}^{1.5} \quad (67)$$

Madsen, em 1991, com base no tipo de movimento das partículas de fundo, propôs a seguinte expressão:

$$\Phi = F_m (Y^{1/2} - 0.7Y_{cr}^{1/2}) (Y - Y_{cr}) \quad (68)$$

O parâmetro F_m depende se o transporte se dá por arrastamento ou por saltação, de acordo com a equação (69).

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{8}{\tan \phi_i} & \text{por arrastamento} \\ F_m &= 9.5 & \text{por saltação} \end{aligned} \quad (69)$$

Nielsen, em 1992, com base em dados para o transporte sólido por arrastamento chegou à seguinte equação (Soulsby, 1997):

$$\Phi = 12\theta^{1/2} (Y - Y_{cr}) \quad (70)$$

2.5.2. TRANSPORTE SÓLIDO EM SUSPENSÃO

Van Rijn, em 1984, de forma a prever o caudal sólido em suspensão, apresentou uma fórmula baseada na concentração de referência, que deve ser avaliada a um nível de referência z_a , dado por metade da altura das configurações de fundo Δ , ou então, no caso de não se conhecerem as

configurações de fundo, pela rugosidade equivalente de Nikuradse $k = 3D_{90}$ e com o valor mínimo de 0.01h (Cardoso, 1998).

$$q_s = F_r U h C_a \quad (71)$$

$$F_r = \frac{\left(\frac{z_a}{h}\right)^{y'_*} - \left(\frac{z_a}{h}\right)^{1.2}}{\left(1 - \frac{z_a}{h}\right)^{y'_*} (1.2 - y'_*)} \quad (72)$$

O número de Rouse já corrigido (y'_*) é dado por:

$$y'_* = y_* + \phi' = \frac{w_s}{\beta' \kappa u_*} + \phi' \quad (73)$$

Onde o termo de correcção do número de Rouse (ϕ') se quantifica de acordo com a equação (74).

$$\phi' = 2.5 \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^{0.8} \left(\frac{C_a}{0.65}\right)^{0.4} \quad (74)$$

E o número de Rouse (y_*) é dado por:

$$y_* = \frac{w_s}{\beta' \kappa u_*} \quad (75)$$

O coeficiente β' , correspondente à relação entre o coeficiente de difusão de sedimentos e a viscosidade aparente, e é obtido pela expressão (76).

$$\beta' = 1 + 2 \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^2 \quad (76)$$

2.5.3. TRANSPORTE SÓLIDO TOTAL

O transporte sólido total corresponde ao conjunto do material transportado pelo escoamento dum curso hídrico, quer em suspensão, quer por arrastamento. Estes dois modos de transporte foram analisados separadamente, no entanto, não é possível definir isoladamente as duas parcelas de transporte, nem considerar que estas são independentes (Cardoso, 1998).

2. Métodos de estimativa de caudais sólidos

Desta forma, pode-se relacionar o transporte em suspensão com o transporte por arrastamento, considerando que o material em suspensão resulta do fundo, admitindo que existe continuidade do material sólido desde o fundo até à superfície. Contudo, quando existe transporte de material sólido proveniente de lavagem do meio envolvente ao curso de água, o transporte em suspensão não é estritamente dependente do material existente no fundo (Cardoso, 1998).

A estimativa do transporte sólido total pode ser obtida recorrendo a leis de transporte sólido por arrastamento e em suspensão considerando a soma das duas parcelas, ou utilizando uma lei própria do transporte sólido total, com base em dados experimentais, que relacione o material transportado com o caudal líquido (Lencastre e Franco, 1992).

Shen e Hung, em 1971, ao aplicar uma regressão múltipla a 514 registos coerentes de dados de laboratório e a 63 registos de rios, chegaram à fórmula (77) de transporte sólido total (Cardoso, 1998).

$$q_t = \frac{Cs_{ppm}}{(Cs_{ppm} - 1)s - Cs_{ppm}} \quad (77)$$

A concentração do material sólido transportado Cs_{ppm} , expressa em partes por milhão resulta da equação (78).

$$\log(Cs_{ppm}) = a_0 + a_1 X' + a_2 (X')^2 + a_3 (X')^3 \quad (78)$$

$$(X')^{1/0.0050702} = \frac{UJ^{0.57}}{w_s^{0.32}} \quad (79)$$

As constantes da equação (78) tomam os seguintes valores: $a_0 = -107404.46$; $a_1 = 324214.75$; $a_2 = 326309.59$ e $a_3 = 109503.87$.

Karim e Kennedy, em 1981, através da análise de valores conhecidos de vinte e um parâmetros adimensionais independentes obtidos de rios e canais de laboratório, deduziram a fórmula (80) de transporte sólido total (Cardoso, 1998).

$$\begin{aligned} \log \left[\frac{q_t}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}} \right] = & -2.279 + 2.972 \log \left[\frac{U}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right] + \\ & + 1.06 \log \left[\frac{U}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right] \log \left[\frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right] + 0.299 \log(Z_{50}) \log \left[\frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right] \end{aligned} \quad (80)$$

Posteriormente, em 1990, sugeriram uma nova fórmula de transporte sólido total mais simples, que apresenta precisões muito semelhante à equação anterior sempre que a velocidade de atrito no fundo u_* , é significativamente superior à velocidade crítica de atrito no fundo u_{*c} , obtendo-se menor rigor para condições próximas das do início do movimento (Cardoso, 1998).

$$\log \left[\frac{q_t}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}} \right] = 0.00151 \left[\frac{U}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right]^{3.369} \left[\frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right]^{0.84} \quad (81)$$

Eugenlud e Hansen, em 1972, conceberam um método originalmente criado para determinar o transporte total por arrastamento em dunas, mas actualmente aplicado, e razoavelmente preciso, como fórmula de estimativa do caudal sólido total (Soulsby, 1997).

$$q_t = \frac{0.04 Cd^{3/2} U^5}{[g(s-1)]^2 D_{50}} \quad (82)$$

Ackers e White, em 1973, propuseram o cálculo do transporte sólido total considerando o transporte por arrastamento e em suspensão separadamente, relacionando cada um dos modos de transporte através de coeficientes empíricos, mediante um intervalo de valores de D_* e utilizando como referência o diâmetro D_{35} , para caracterizar a dimensão dos sedimentos (Soulsby, 1997).

$$q_t = C_{aw} U D_{35} \left(\frac{U}{u_*} \right)^n \left(\frac{F_{aw} - A_{aw}}{A_{aw}} \right)^m \quad (83)$$

O factor F_{aw} é expresso por:

$$F_{aw} = \frac{u_*^n}{[g(s-1)D]^{1/2}} \left[\frac{U}{2.46 \ln \left(\frac{10h}{D_{35}} \right)} \right]^{1-n} \quad (84)$$

De acordo com Soulsby (1997), na metodologia de Ackers e White, a velocidade de atrito junto ao fundo deve ser obtida pela aplicação da expressão (85), determinada por White *et al.* (1980).

$$u_* = Cd^{1/2} U \quad (85)$$

Os valores dos coeficientes apresentados nas expressões anteriores estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de Ackers e White (Soulsby, 1997).

se $1 < D_* \leq 60$	se $D_* > 60$
$n = 1 - 0.243 \ln(D_*)$	$n = 0$
$A_{aw} = \frac{0.23}{D_*^{1/2}} + 0.14$	$A_{aw} = 0.17$
$m = \frac{9.66}{D_*} + 1.34$	$m = 1.5$
$C_{aw} = \exp[2.86 \ln(D_*) - 0.424 \ln(D_*)^2 - 8.13]$	$C_{aw} = 0.025$

Baseado em dados mais recentes, a metodologia de Ackers e White foi revista em 1990, chegando a novos valores e expressões de cálculo para os coeficientes de m e C_{aw} , apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes de Ackers e White revistos (Soulsby, 1997).

se $1 < D_* \leq 60$	se $D_* > 60$
$n = 1 - 0.243 \ln(D_*)$	$n = 0$
$A_{aw} = \frac{0.23}{D_*^{1/2}} + 0.14$	$A_{aw} = 0.17$
$m = \frac{6.93}{D_*} + 1.67$	$m = 1.78$
$C_{aw} = \exp[2.79 \ln(D_*) - 0.426 \ln(D_*)^2 - 7.97]$	$C_{aw} = 0.025$

Van Rijn, em 1984, propôs a fórmula (86) para o cálculo do transporte sólido total baseada na soma das parcelas correspondentes ao transporte por arrastamento e em suspensão (Coelho *et al.*, 2007).

$$q_t = q_s + q_b \quad (86)$$

3. TABELA DE CÁLCULO

A programação de diferentes metodologias de cálculo permite testar a sensibilidade a variáveis de difícil definição e obter uma ferramenta de utilização fácil na comparação rápida de diferentes alternativas.

A modelação dos métodos de transporte sedimentar numa folha de cálculo, teve como suporte o Microsoft Excel, com o auxílio de programação em Visual Basic. Optou-se por elaborar um ficheiro que contém seis folhas de cálculo. Esta divisão teve em conta uma melhor organização dos parâmetros de cálculo de forma a facilitar o acesso a dados específicos e a respeitar a sequência das operações.

Para a concepção desta ferramenta de cálculo automático foram considerados os métodos apresentados no estado da arte, que nesta dissertação se insere no capítulo 2. A programação dos diversos métodos apresentados não foi possível realizar para todos os métodos estudados, pelo que foram excluídos aqueles que não apresentavam viabilidade no que diz respeito à sua programação. Desta forma, foram rejeitados os métodos com recurso a ábacos ou gráficos e os que apresentam metodologias com recurso a cálculo de integrais.

Foram considerados nove métodos de cálculo do caudal sólido transportado por arrastamento, uma metodologia para a determinação do volume transportado em suspensão e seis fórmulas de estimativa do transporte total. Associado à determinação do transporte sólido existe um número significativo de parâmetros de cálculos que também são determinados por esta ferramenta de cálculo.

Na elaboração das folhas de cálculo, existiu o cuidado de em qualquer dos parâmetros intervenientes, ser permitido ao utilizador conhecer quais os dados em falta para a determinação desse mesmo parâmetro. Desta forma, mesmo que o utilizador não disponha de todos os dados solicitados, o cálculo pode ser efectuado para cada método, dependendo dos dados disponíveis.

Na primeira folha, Figura 5, devem ser inseridos todos os dados gerais conhecidos sobre o caso em estudo, nomeadamente as características geométricas do canal, as características do escoamento, as características dos sedimentos e do fluido. Após o preenchimento desta folha de cálculo, o utilizador deve verificar se no final da respectiva página existe alguma mensagem de alerta, que poderá surgir caso algum dos parâmetros não seja coerente ou não se ajuste a outras grandezas introduzidas.

3. Tabela de cálculo

ESPAÇOS A PREENCHER

LIMPAR

Atenção: ao premir este botão realiza uma limpeza geral dos dados

PROGRAMAÇÃO DE MODELOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR
COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CANAL

Dados gerais:

Data:

Localização:

Características geométricas do canal:

Largura de rasto do canal

B

(m)

Perda de carga unitária, aproximadamente igual ao declive

J=i

(%)

Características do escoamento:

Caudal total

Q

(m³/s)

Dados dos sedimentos e fluido:

Diâmetro de peneiração tal que 15.9% em peso é mais fino

D_{15.9}

(mm)

Diâmetro de peneiração tal que 35% em peso é mais fino

D₃₅

(mm)

Diâmetro de peneiração médio

D₅₀

(mm)

Diâmetro de peneiração tal que 75% em peso é mais fino

D₇₅

(mm)

Diâmetro de peneiração tal que 84.1% em peso é mais fino

D_{84.1}

(mm)

Diâmetro de peneiração tal que 90% em peso é mais fino

D₉₀

(mm)

Factor de forma dos sedimentos

η

Peso volúmico da água

γ

(N/m³)

Peso volúmico do grão do material sólido

γ_s

(N/m³)

Porosidade

v

Viscosidade cinemática da água

ν

(m²/s)

Aceleração da gravidade

g

(m/s²)

Coefficiente de Manning-Strickler

K_s

(m^{1/3}/s)

Figura 5 - Folha indicativa das características gerais do caso em estudo.

A folha seguinte, Figura 6, apresenta alguns resultados de parâmetros necessários ao estudo do transporte sólido e que resultam da caracterização geral precedente. Estes parâmetros encontram-se subdivididos por características geométricas do canal, características do escoamento, dados relativos às características dos sedimentos e do fluido.

Esta folha apresenta alguns valores estimados para alguns parâmetros, nomeadamente para a altura da forma do fundo, altura do escoamento e coeficiente de graduação. Nestes parâmetros é indispensável que o utilizador tome decisões e que opte pelo valor apresentado ou outro valor que se assemelhe melhor à situação em estudo. Outra situação, que ocorre na determinação do coeficiente de arrastamento, está associada à opção de escolha do método de cálculo. Os resultados dos diferentes métodos de cálculo estudados são indicados ao utilizador, este deve efectuar a escolha de uma alternativa que poderá incidir sobre os modelos apresentados, por o valor máximo ou mínimo e ainda a média ou mediana de todos os resultados obtidos.

ESPAÇOS A PREENCHER

PROGRAMAÇÃO DE MODELOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

FOLHA DE RESULTADOS

Características geométricas do canal:

Área da secção			$A \text{ (m}^2\text{)}$	Introduzir h
Raio hidráulico			$R \text{ (m)}$	Escolher secção
Altura estimada da forma do fundo	$\Delta \text{ (m)}$	Introduzir D50	Valor:	
Altura estimada do escoamento	$h \text{ (m)}$	Escolher secção	Valor:	

Características do escoamento:

Velocidade de atrito em função da rugosidade do grão			$u_* \text{ (m/s)}$	Introduzir g
Velocidade crítica de atrito junto ao fundo ($D = D_{50}$)			$u_{*c} \text{ (m/s)}$	Introduzir D50
Velocidade de atrito junto ao fundo			$u_* \text{ (m/s)}$	Introduzir $J=i$
Parâmetro de Shields correspondente ao início do movimento			Y_{α}	Introduzir D50
Velocidade média			$U \text{ (m/s)}$	Introduzir h
Parâmetro adimensional de capacidade de transporte			T	Introduzir D90

Características dos sedimentos e fluido:

Densidade do grão das partículas de material sólido			s	Introduzir γ
Massa volumica da água			$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Introduzir g
Massa volumica das partículas			$\rho_s \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Introduzir g
Diâmetro adimensional do material do fundo ($D = D_{50}$)			$D_* \text{ (mm)}$	Introduzir D50
Diâmetro representativo do material transportado em suspensão ($D = D_{50}$)			$D_s \text{ (mm)}$	Introduzir D84.1
Coefficiente de graduação estimado	$\sigma_D \text{ (mm)}$	Introduzir D84.1	Valor:	

Coefficiente de arrastamento

Manning-Strickler

Coefficiente de arrastamento	C_d	Introduzir D50
------------------------------	-------	----------------

Dawson-Johns

Coefficiente de arrastamento	C_d	Introduzir D50
------------------------------	-------	----------------

Soulsby

Coefficiente de arrastamento	C_d	Introduzir D50
------------------------------	-------	----------------

F. Logaritmica

Coefficiente de arrastamento	C_d	Introduzir D50
------------------------------	-------	----------------

Método de cálculo:

Coefficiente de arrastamento	C_d	Escolher método de cálculo
------------------------------	-------	----------------------------

Figura 6 - Folha de resultados gerais.

Após apresentação do valor de alguns parâmetros essenciais para o estudo do transporte sólido, procede-se à caracterização do movimento das partículas, que corresponde à folha de cálculo apresentada na Figura 7.

Nesta folha são descritos dois conceitos para caracterizar o início do movimento das partículas, um deles está associado à tensão crítica (τ_c) e o outro à velocidade crítica (U_{cr}). Em ambos são abordados vários métodos de cálculo, sendo permitido ao utilizador escolher um dos métodos, cujo

3. Tabela de cálculo

valor da tensão crítica de arrastamento ou de velocidade crítica será comparado com o valor da tensão de arrastamento (τ_0) ou velocidade média (U), respectivamente. Desta comparação de resultados pode-se concluir se para a situação em estudo, existe ou não movimento das partículas.

ESPAÇOS A PREENCHER

PROGRAMAÇÃO DE MODELOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES		
CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS		
Conceito da tensão crítica		
Highway Research Board		
Tensão crítica de arrastamento	τ_c (N/m ²)	Introduzir D50
Schoklitsch		
Tensão crítica de arrastamento	τ_c (N/m ²)	Introduzir D50
DuBoys		
Tensão crítica de arrastamento	τ_c (N/m ²)	Introduzir D50
Van Rijn		
Tensão crítica de arrastamento	τ_c (N/m ²)	Introduzir D50
Método de cálculo:		
Tensão crítica de arrastamento	τ_c (N/m ²)	Escolher método de cálculo
Tensão de arrastamento	τ_0 (N/m ²)	Introduzir γ
Caracterização do movimento das partículas: Introduzir dados		
Conceito da velocidade média crítica		
Goncharov		
Velocidade crítica	U_{cr} (m/s)	Introduzir h
Grade		
Velocidade crítica	U_{cr} (m/s)	Introduzir h
Neil		
Velocidade crítica	U_{cr} (m/s)	Introduzir h
Van Rijn		
Velocidade crítica	U_{cr} (m/s)	Introduzir h
Método de cálculo:		
Velocidade crítica	U_{cr} (m/s)	Escolher método de cálculo
Velocidade média	U (m/s)	Introduzir dados
Caracterização do movimento das partículas: Introduzir dados		

Figura 7 - Folha de caracterização do início do movimento das partículas.

Nas restantes três folhas de cálculo apresentadas nas Figura 8, Figura 9 e Figura 10, encontram-se os métodos necessários para a determinação do transporte sólido.

Na Figura 8 apresenta-se o cálculo do transporte sólido por arrastamento onde são apresentados vários valores para a quantidade de material sólido transportado associados a cada método, cabendo ao utilizador a obrigação de escolher um desses métodos para posteriores cálculos.

ESPAÇOS A PREENCHER

PROGRAMAÇÃO DE MODELOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR
COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTAMENTO

Transporte sólido por arrastamento

Fórmula de Meyer-Peter e Müller
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir D50

Fórmula de Parker et al
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir J=i

Fórmula de Van Rijn
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir D90

Fórmula de Einstein-Brown
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir s

Fórmula de Nielsen
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir D50

Fórmula de Madsen
Ângulo de repouso dos sedimentos ϕ_i (°)

Caudal sólido por arrastamento (volume) q_b (m³/s) Introduzir D50
Caudal sólido por saltação (volume) q_b (m³/s) Introduzir D50

Fórmula de Wilson
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir D50

Fórmula de Ashida e Michiue
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir D50

Fórmula de Yalin
Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Introduzir D50

Método de cálculo:

Caudal sólido arrastado (volume) q_b (m³/s) Escolher método de cálculo

Figura 8 - Folha de cálculo do transporte sólido por arrastamento.

A Figura 9 apresenta o cálculo do transporte sólido em suspensão, bem como alguns dos parâmetros indispensáveis para a determinação do mesmo, nomeadamente a velocidade de queda das partículas (w_s), concentração de referência (C_a) e distância ao fundo (z_a). Para a determinação do caudal sólido em suspensão é indispensável que o utilizador opte por um dos métodos de cálculo para cada um dos parâmetros acima referidos.

ESPAÇOS A PREENCHER

PROGRAMAÇÃO DE MODELOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR
COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

TRANSPORTE SÓLIDO EM SUSPENSÃO

Velocidade de queda das partículas

Fórmula de Gibbs et al.
Velocidade de queda das partículas w_s (m/s) Introduzir U

Fórmula de Hallermeier
Velocidade de queda das partículas w_s (m/s) Introduzir U

Fórmula de Soulsby
Velocidade de queda das partículas w_s (m/s) Introduzir U

Fórmula de Van Rijn
Velocidade de queda das partículas w_s (m/s) Introduzir U

Método de cálculo:
Velocidade de queda das partículas w_s (m/s) Escolher método de cálculo

Concentração de referência e distância de referência

Fórmula de Smith e McLean
Distância do fundo concentração de referência z_a (m) Introduzir D90
Concentração de referência C_a Introduzir D90

Fórmula de Van Rijn
Distância do fundo concentração de referência z_a (m) Introduzir D50
Concentração de referência C_a Introduzir D90

Fórmula de Zyserman e Fredsøe
Distância do fundo concentração de referência z_a (m) Introduzir D50
Concentração de referência C_a Introduzir D50

Método de cálculo:
Distância do fundo concentração de referência z_a (m) Escolher método de cálculo
Concentração de referência C_a Escolher método de cálculo

Transporte sólida em suspensão

Fórmula de Van Rijn
Caudal sólido em suspensão (volume) q_s (m³/s) Introduzir h

Figura 9 - Folha de cálculo do transporte sólido em suspensão.

De notar que o cálculo da concentração de referência à distância ao fundo z_a é determinada de acordo com o respectivo método, não se admitindo que estes dois parâmetros possam ser determinados recorrendo a métodos distintos.

A última folha de cálculo, Figura 10, contém vários métodos que permitem a determinação do caudal sólido total, e tal como nas restantes folhas, cabe ao utilizador a escolha do processo mais apropriado.

ESPAÇOS A PREENCHER

PROGRAMAÇÃO DE MODELOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR
COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

TRANSPORTE SÓLIDO TOTAL

Transporte sólida total

Fórmula de Shen e Hung

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Introduzir U

Fórmula de Eugelund e Hansen

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Introduzir g

Fórmula de Ackers e White

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Introduzir g

Fórmula de Ackers e White (revisto)

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Introduzir g

Fórmula de Karim e Kennedy

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Introduzir R

Fórmula de Karim e Kennedy (revisto)

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Introduzir R

Fórmula de Van Rijn

Caudal sólido arrastado (volume)

q_b (m^3/s) Escolher método de cálculo

Caudal sólido em suspensão (volume)

q_s (m^3/s) Introduzir h

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Introduzir dados

Método de cálculo:

Caudal sólido total (volume)

q_t (m^3/s) Escolher método de cálculo

Figura 10 - Folha de cálculo do transporte sólido total.

Como se pode verificar no capítulo 2 relativo a métodos de estimativa de caudais sólidos, existem alguns métodos que contêm determinados condicionalismos para a sua aplicação. Estas condições foram incorporadas nas folhas de cálculo de forma a evitar a utilização de métodos cujos valores não teriam significado ou apresentariam resultados bastante díspares dos obtidos pelos restantes métodos. No entanto apenas foram consideradas as condições explícitas de aplicação, não se admitindo como requisito de aplicabilidade os pressupostos adoptados pelos autores para a formulação das diversas metodologias de cálculo.

Desta forma, quando para um determinado método não se verificam as condições de aplicabilidade, o resultado apresentado pelas folhas de cálculo surge sobre uma mensagem informativa contendo o texto “Não aplicável”. Esta mensagem não surge apenas devido às condições de aplicabilidade dos métodos, podendo também surgir quando no processo de cálculo resultam valores inconsistentes com as formulações matemáticas, devido à associação de dados pouco realistas.

4. TESTE DE COMPORTAMENTO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADES

Neste capítulo foram estudados os resultados obtidos para os diversos métodos de estimativa de caudais sólidos e alguns dos parâmetros intervenientes na sua determinação, referidos no capítulo 2. Com esta análise pretende-se diminuir a incerteza associada à caracterização dos diversos fenómenos devido à sua complexidade e avaliar quais as grandezas com maior influência nos resultados do transporte sólido, até porque os diversos métodos foram obtidos com base em diferentes pressupostos. Assim, utilizando a ferramenta de cálculo automática descrita no capítulo anterior, foram consideradas situações idênticas de modelação e posteriormente analisados os resultados obtidos entre os diferentes métodos expostos de forma a possibilitar a comparação directa da influência nos resultados dos vários métodos.

Na análise efectuada foram considerados alguns valores constantes para as características do fluido, do escoamento e dos sedimentos. Foi admitida uma secção com geometria rectangular e estabelecido um valor fixo para a aceleração da gravidade de 9.81 m/s^2 , peso volúmico da água de 9800 N/m^3 , densidade das partículas de 2.7, viscosidade cinemática da água de $1.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e coeficiente de Manning-Strickler de $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, já que estes parâmetros têm uma variação pequena na globalidade dos casos, não se verificando grandes alterações nos valores que resultam da aplicação dos diversos métodos.

Fez-se variar a dimensão média dos sedimentos na gama correspondente às areias, ou seja, com dimensões entre 0.062 mm e 2.0 mm. Admitiu-se uma relação constante entre a dimensão média dos sedimentos (D_{50}) e o diâmetro correspondente a 15.9%, 35%, 75%, 84.1% e 90% do material sólido dos sedimentos. Considerou-se que a relação entre diâmetros poderia ser aproximada a $D_{15.9} = 0.4D_{50}$; $D_{35} = 0.8D_{50}$; $D_{75} = 1.5D_{50}$; $D_{84.1} = 1.6D_{50}$ e $D_{90} = 1.7D_{50}$ para todos os cálculos efectuados em que estes parâmetros intervêm. Naturalmente, estas relações não se verificarão em muitas curvas granulométricas que caracterizam sedimentos reais, mas serve de indicação e permite uma comparação entre métodos sem introduzir outra relação de dependência.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS

A caracterização do movimento das partículas está associada directamente ao início do fenómeno do transporte. Foram abordados dois conceitos para estimar o momento para qual se inicia o transporte sólido, nomeadamente a tensão crítica de arrastamento e a velocidade crítica. Neste subcapítulo tenta-se avaliar quais das propostas e métodos apresentados resulta em valores mais coerentes.

4.1.1. TENSÃO CRÍTICA DE ARRASTAMENTO

Dos métodos em análise, apenas o de Schoklisch tem em consideração o factor de forma dos sedimentos que pode variar entre 1.0 para esferas e 4.4 para rocha lascada. Para compreender melhor a influência do factor de forma neste método procedeu-se à análise da expressão (6), obtendo uma gama de valores que se traduz no gráfico apresentado na Figura 11.

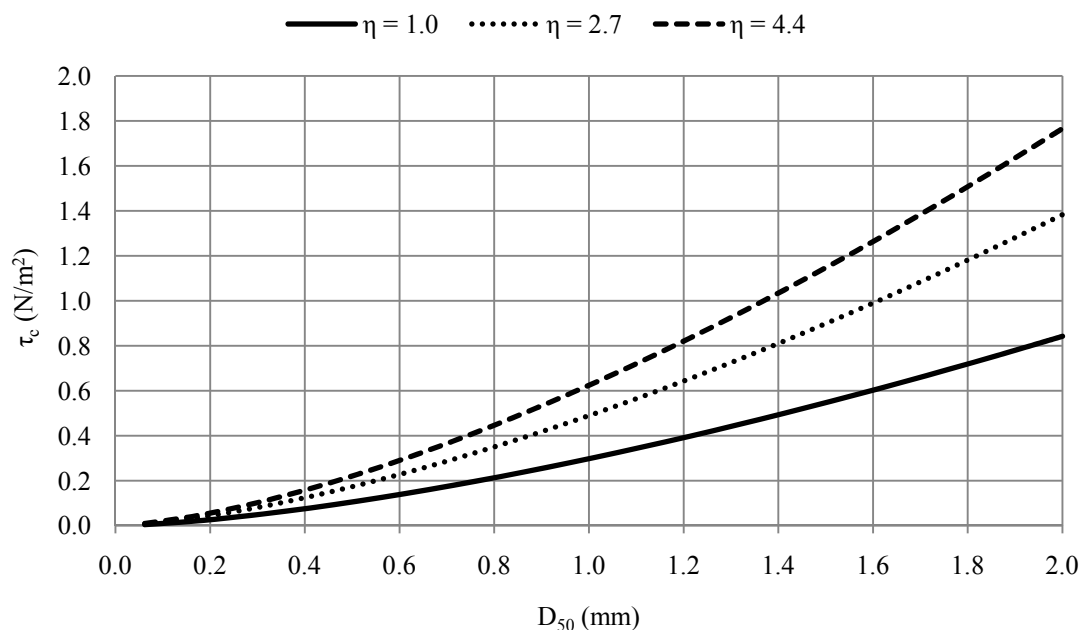


Figura 11 - Variação da tensão crítica (τ_c) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}) para diferentes factores de forma (η), segundo Schoklisch.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o valor da tensão crítica de arrastamento aumenta com o crescimento da dimensão das partículas independentemente do valor admitido para o factor de forma. Observa-se que o factor de forma influencia directamente o resultado da tensão crítica, ou seja, o aumento progressivo do factor de forma está associado ao crescimento da tensão crítica. Esta relação é proporcional e verificou-se que a diferença relativa entre os resultados para factores de forma de 1.0 e 2.7 é cerca de 64% e entre 2.7 e 4.4 é de 28%. Isto corresponde à obtenção de curvas com uma variação relativa de 110% entre valores máximos e mínimos correspondentes a valores de factores de forma respectivamente de 1.0 e 4.4. Desta forma admitiu-se a utilização de um factor de forma intermédio ($\eta=2.7$) para posteriores comparações deste método com os restantes. Este pressuposto reduz a possibilidade de diferenças maiores para métodos que não considerem directamente a forma dos sedimentos e é aceitável até pela forma que os sedimentos apresentam normalmente na natureza.

De forma a perceber a variação do resultado das expressões para o cálculo da tensão crítica, procedeu-se à análise de cada método, obtendo-se os valores representados no gráfico da Figura 12. De salientar que nesta análise, não foi considerado o método de Lane, pois não é aplicável à gama de valores das dimensões dos agregados em estudo (areias), mas apenas a sedimentos com dimensão média (D_{50}) superior a 2 mm.

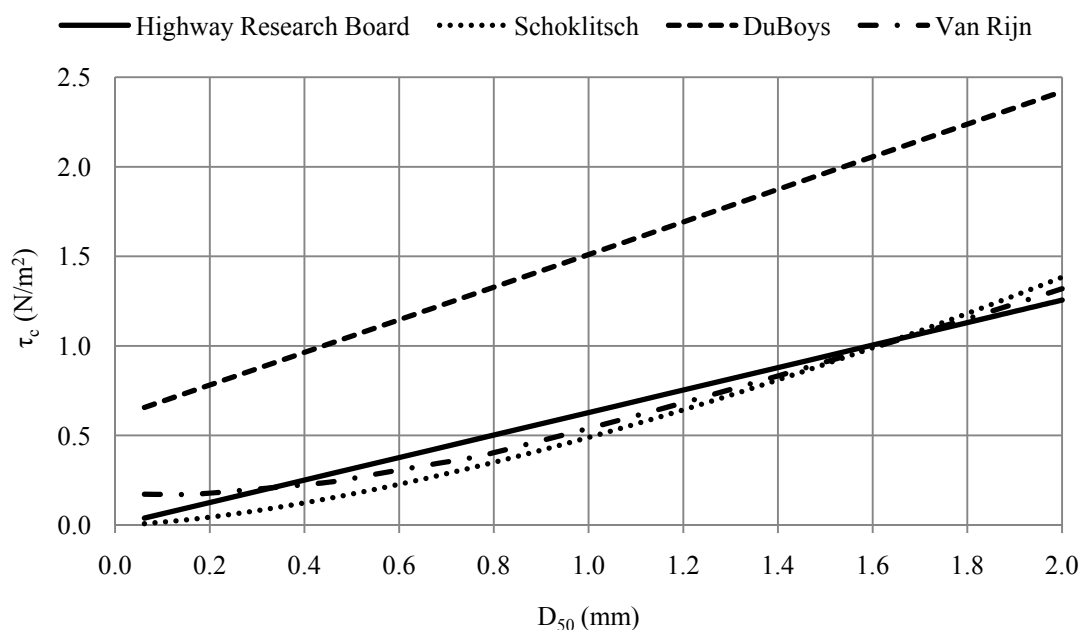


Figura 12 - Variação da tensão crítica (τ_c) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).

Comparando os resultados, verifica-se que o método de DuBoys se afasta dos outros métodos em análise, apresentando valores bastante mais elevados para a tensão crítica de arrastamento relativamente aos outros modelos de cálculo, pelo que se optou por não incluir este método na análise comparativa da tensão crítica apresentada da Tabela 9.

Relativamente aos outros três métodos de cálculo, verifica-se que apresentam valores bastante aproximados, existindo vários pontos em que as curvas cruzam entre si. Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o aumento da dimensão das partículas provoca um acréscimo da tensão crítica em todos os métodos em estudo.

De forma a compreender melhor as diferenças dos resultados da tensão crítica obtida para estes três métodos em estudo, na Tabela 9 encontram-se alguns dos valores obtidos para pontos extremos de dimensão das partículas e respectiva variação relativa máxima em percentagem.

Tabela 9 - Comparação da tensão crítica (N/m²).

D ₅₀ (mm)	η	Highway Research Board	Schoklitsch	Van Rijn	Variação máxima
0.062	2.7	0.039	0.008	0.172	2175%
2.000		1.256	1.383	1.319	10%

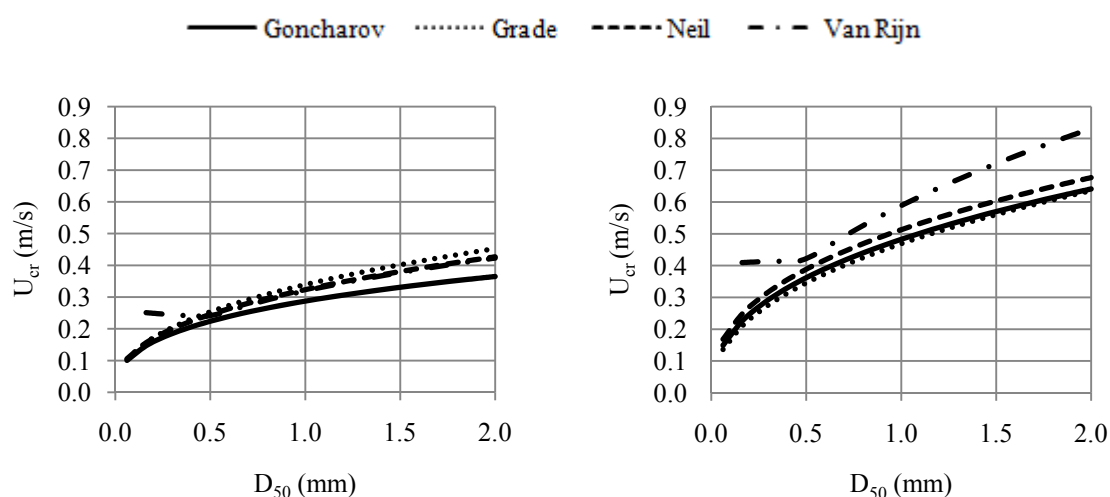
Para valores de dimensão dos sedimentos baixos, verifica-se uma maior incerteza relativa nos valores obtidos para a tensão crítica de arrastamento entre estes três métodos. Esta incerteza diminui com o aumento da dimensão dos sedimentos, obtendo-se uma incerteza de 10% para valores de tensão crítica, para dimensões médias dos sedimentos correspondente a 2 mm.

Da análise efectuada pode-se concluir que o método de Van Rijn é o que apresenta valores intermédios para a maioria da gama de areias, pelo que para os cálculos posteriores onde seja necessária a consideração da tensão crítica de arrastamento se tomará em conta os valores que resultam deste método.

4.1.2. VELOCIDADE CRÍTICA

Para uma melhor compreensão da variação dos valores da velocidade crítica para cada método, procedeu-se à análise dos diversos métodos considerando as mesmas condições de cálculo. A tensão crítica é dependente da altura do escoamento, como tal, foram avaliados os comportamentos para duas situações, considerando alturas de escoamento distintas, obtendo-se os valores apresentados na Figura 13.

Analisando os resultados obtidos na Figura 13, verifica-se que o valor da velocidade crítica aumenta com o acréscimo da dimensão média dos sedimentos e também com o aumento da altura do escoamento. Para alturas de escoamento baixas os métodos apresentam resultados relativamente próximos, existindo uma zona com maiores incertezas correspondente a diâmetros de sedimentos mais baixos, por efeito das diferenças obtidas com o método de Van Rijn. Este facto ocorre pois este método compreende dois troços, traduzidas por duas equações, em que a primeira equação, relativa a diâmetros menores, apresenta claramente valores divergentes em relação aos obtidos pelos restantes métodos. A segunda equação apresenta valores que formam uma curva semelhante à obtida pelos restantes métodos. Com o aumento da altura do escoamento os valores de velocidade crítica obtidos pelo método de Van Rijn vão-se afastando dos valores obtidos pelos outros métodos, aumentando consecutivamente a incerteza associada aos valores de tensão crítica.


 a) Altura do escoamento $h = 0.1$ m

 b) Altura do escoamento $h = 10$ m

 Figura 13 - Variação da velocidade crítica (U_{cr}) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).

As variações relativas entre os métodos em estudo são apresentadas na Tabela 10. Como pelo método de Van Rijn apresenta resultados apenas para valores superiores a 0.1 mm, nesta análise foi considerado o valor de dimensão das partículas mínimo ($D_{50} = 0.162$ mm) que apresente resultados em todos os métodos.

Tabela 10 - Comparação da velocidade crítica (m/s).

D_{50} (mm)	h (m)	Goncharov	Grade	Neil	Van Rijn	Variação máxima
0.162	0.1	1.47E-01	1.57E-01	1.56E-01	2.51E-01	71%
2.000		3.65E-01	4.53E-01	4.27E-01	4.23E-01	24%
0.162	10	2.25E-01	2.09E-01	2.48E-01	4.10E-01	96%
2.000		6.41E-01	6.35E-01	6.77E-01	8.31E-01	31%

Analisando os valores da Tabela 10, verifica-se que existe uma variação relativa mais elevada para dimensões das partículas menores, observando-se uma diminuição desta variação à medida que a dimensão das partículas aumenta. Como foi referido, este facto deve-se aos resultados do método de Van Rijn, para a gama de diâmetros mais baixos. Estas variações da velocidade crítica são ampliadas com o acréscimo da altura do escoamento.

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

O método de Neil apresenta valores para a velocidade crítica mais concordantes com os valores médios de todos os métodos em análise, pelo que se pode considerar este método como referência para utilizações futuras.

Comparando os resultados obtidos pelos dois conceitos descritos anteriormente, verifica-se que pelo conceito da velocidade crítica se obtêm menores variações relativas entre os diversos métodos que permitem estimar este parâmetro. Esta discrepância é mais acentuada para diâmetros das partículas mais elevadas, dentro da gama de valores em estudo. No entanto para dimensões menores das partículas esta tendência é invertida e é para o conceito da tensão crítica que se obtêm menores variações relativas.

Os resultados demonstram que, é difícil determinar o início do movimento das partículas, podendo ocorrer situações de conflito entre os vários métodos, ou seja, para as mesmas características de escoamento e numa situação limite de início de movimento, pode-se concluir que existe movimento segundo um método e que por outro lado não existe movimento quando se opta pelo cálculo segundo outra metodologia. O mesmo pode acontecer quando se avalia o início de movimento das partículas recorrendo ao conceito da tensão crítica ou da velocidade crítica, surgindo situações ambíguas.

4.2. PARÂMETROS DE CÁLCULO DO TRANSPORTE SÓLIDO

Dos parâmetros apresentados anteriormente, optou-se por avaliar os resultados obtidos para alguns desses parâmetros, de forma a compreender a variação obtida pelos diversos métodos bem como a influência que estes apresentam na determinação do caudal sólido transportado.

4.2.1. COEFICIENTE DE ARRASTAMENTO

A variação do coeficiente de arrastamento em função da granulometria e da altura do escoamento foi obtida por aplicação de quatro métodos de cálculo distintos em função da submersão relativa. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14.

Verifica-se que existe uma conformidade dos valores obtidos com os pressupostos referidos no capítulo 2, ou seja, o acréscimo da razão entre a rugosidade relativa do fundo e a altura do escoamento é acompanhado pelo aumento do coeficiente de arrastamento. Para a generalidade dos valores desta razão, verifica-se que o método de cálculo do coeficiente de arrastamento que resulta em valores mais baixos é o de Manning-Strickler. Os restantes métodos de cálculo apresentam valores mais próximos, chegando a cruzar em alguns pontos.

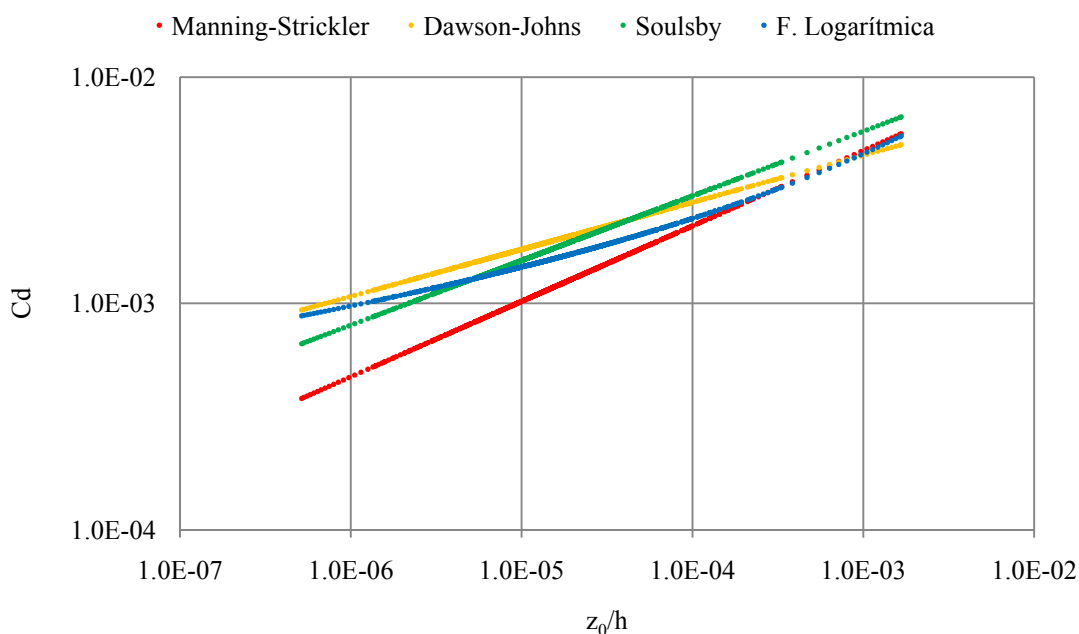


Figura 14 - Coeficiente de arrastamento (C_d) em função da razão entre a rugosidade relativa do fundo e a altura do escoamento (z_0/h).

Na Tabela 11 é possível observar as incertezas associadas à escolha de um método de cálculo para determinar o coeficiente de arrastamento. Estas incertezas estão relacionadas com a variação relativa que existe entre os métodos, ou seja, num determinado ponto existe uma certa amplitude de valores correspondente a cada um dos métodos.

Tabela 11 - Comparação do coeficiente de arrastamento.

D_{50} (mm)	z_0/h	Manning-Strickler	Dawson-Johns	Soulsby	F. Logarítmica	Variação máxima
0.062	5.17E-07	3.80E-04	9.36E-04	6.63E-04	8.81E-04	146%
2.000	1.67E-03	5.62E-03	5.02E-03	6.67E-03	5.49E-03	33%

Pelos resultados apresentados verifica-se que existem diferenças relativas entre os resultados dos diversos métodos com variações na ordem dos 146% para valores mínimos da razão entre a rugosidade relativa do fundo e a altura do escoamento, e na ordem dos 33% para os valores máximos.

No seguimento deste trabalho, todos os cálculos em que foi necessário o coeficiente de arrastamento, adoptou-se a relação logarítmica, para a determinação do seu valor, por ser aquela

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

que conduz a resultados intermédios e de acordo com Soulsby (1997), ser de utilização generalizada.

4.2.2. VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS

A velocidade de queda das partículas é um parâmetro indispensável para a determinação do transporte sólido em suspensão, pelo que se procedeu à análise deste parâmetro em função da dimensão média dos sedimentos, de forma a compreender a evolução de comportamento desta grandeza. Este estudo está presente na Figura 15.

Para a análise do comportamento da velocidade de queda em função do caudal e da dimensão média dos sedimentos foi considerada uma secção rectangular de largura unitária. Foi ainda considerada a variação do caudal líquido, o que se traduz numa variabilidade da altura do escoamento.

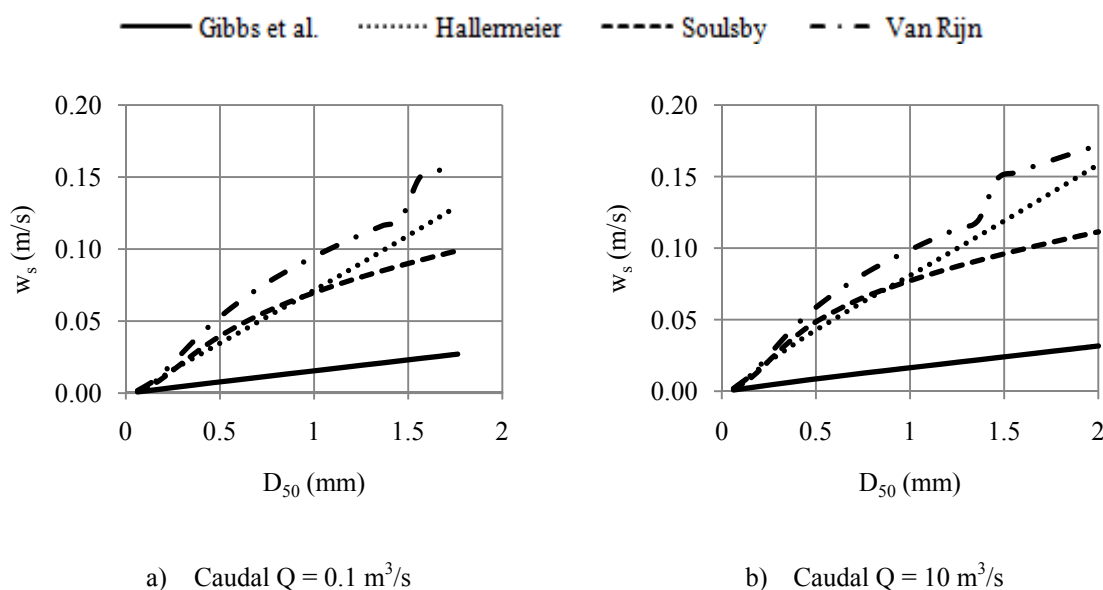


Figura 15 - Variação da velocidade de queda das partículas (w_s) em função da dimensão média dos sedimentos (D_{50}).

A partir dos resultados obtidos na Figura 15, verifica-se que para todos os métodos em análise, o aumento do caudal provoca poucas variações dos valores da velocidade de queda das partículas. Apesar disso, essa pequena variação tem mais significado para sedimentos de menor dimensão.

O método de Gibbs *et al.*, resulta em valores de velocidade de queda das partículas mais baixo em relação aos restantes métodos. Os outros métodos apresentam valores mais próximos entre si, sendo o método de Van Rijn, aquele que apresenta valores mais elevados para velocidade de queda

das partículas. A variação brusca na curva relacionada com Van Rijn para valores de D_{50} próximos de 1.5 mm deve-se à existência de três trechos traduzidos pelas equações (26), que definem a velocidade de queda das partículas dependendo da dimensão das partículas. Como se pode observar a transição entre estes trechos não é linear, existindo uma descontinuidade nos pontos de transição.

Na Figura 15 a), apresenta uma zona, correspondente a diâmetros das partículas elevados, onde não são obtidos valores de velocidade de queda das partículas. Estes resultados ocorrem devido à inexistência de movimento de partículas para esta gama de valores.

Na Tabela 12 são apresentadas as variações relativas máximas entre os valores obtidos para as dimensões das partículas mínima e máxima da gama de valores em estudo. Os resultados apresentados nesta tabela não têm em conta os valores obtidos pelo método de Gibbs *et al.*, por se verificar que por este método se obtêm resultados significativamente inferiores de velocidade de queda das partículas comparativamente com as restantes formulações.

Tabela 12 - Comparação da velocidade de queda das partículas (m/s).

D_{50} (mm)	Q (m^3/s)	Hallermeier	Soulsby	Van Rijn	Variação máxima
0.062	0.1	1.20E-03	1.09E-03	1.65E-03	51%
1.762		1.30E-01	9.89E-02	1.59E-01	61%
0.062	10	1.61E-03	1.46E-03	2.00E-03	37%
1.762		1.40E-01	1.04E-01	1.62E-01	55%

Nesta análise, adoptou-se como limites de dimensão média das partículas valores para os quais se obtêm resultados de velocidade de queda das partículas para todos os métodos em estudo. A situação mais condicionante é apresentada na Figura 15 a), que define um limite máximo de 1.762 mm para qual se obtêm valores de velocidade de queda das partículas. Desta forma, para possibilitar uma comparação com os resultados obtidos na Figura 15 a) e Figura 15 b), foi adoptado o mesmo limite em ambos os casos.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que existe uma maior dispersão entre os valores obtidos por cada método para dimensões dos sedimentos maiores, comparativamente com os obtidos para dimensões dos sedimentos menores. Com o aumento do caudal líquido observa-se a diminuição da variação relativa, sendo esta diminuição mais acentuada para dimensões dos sedimentos mais reduzidas. Com o aumento do caudal líquido, para a gama de dimensões dos

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

sedimentos em estudo, verifica-se uma aproximação dos valores da velocidade de queda das partículas obtida pelos diferentes métodos.

Em futuros cálculos em que a velocidade de queda das partículas possa intervir, considera-se o método de Soulsby para a determinação deste parâmetro, pois apresenta valores intermédios em relação aos restantes métodos analisados.

4.2.3. CONCENTRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DISTÂNCIA AO FUNDO

A determinação da concentração de referência (C_a) e da distância z_a em relação ao fundo são parâmetros indispensáveis para a estimativa do caudal sólido transportado em suspensão.

Inicialmente deve ser avaliada a distância ao fundo a partir da qual se obtém a concentração de referência. A análise da Figura 16, permite uma melhor percepção da variação dos valores da distância ao fundo (z_a) obtidos pelos diversos métodos descritos.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o método de Smith e McLean não apresenta resultados para valores correspondentes a diâmetros das partículas elevados. Estes resultados estão relacionados com a inexistência de movimento de partículas para esta gama de valores. A determinação da distância ao fundo através dos restantes métodos é obtida apenas considerando a dimensão das partículas, como se pode verificar nas expressões (31) e (33), pelo que não são tidas em conta as condições de início de movimento das partículas.

Como se pode observar na Figura 16, com o aumento do diâmetro representativo dos sedimentos verifica-se um acréscimo da distância ao fundo no método de Van Rijn e Zyserman e Fredsøe. Pode-se ainda verificar que o caudal provoca o mesmo efeito acima descrito, ou seja, com o aumento do caudal existe um aumento da distância ao fundo. O método de Zyserman e Fredsøe não apresenta variações com o acréscimo do caudal, pois como se verifica pela expressão (33), este método depende apenas da dimensão média das partículas.

A expressão de Van Rijn, em comparação com os outros modelos de cálculo, apresenta resultados para a distância ao fundo mais elevados. Esta diferença é menos significativa quanto menor for o caudal e aumenta com o aumento do caudal. Neste método não se considerou a configuração de fundo, pelo que os resultados obtidos dependem apenas da rugosidade do grão e da altura do escoamento. Como se pode verificar, com um caudal de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, existe uma descontinuidade dos valores obtidos para este método pois para valores médios das partículas aproximadamente inferiores a 0.5 mm os resultados são obtidos através da altura do escoamento, por outro lado, para

valores superiores o valor de z_a é determinado em função da dimensão das partículas. O mesmo já não se verifica para um caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, cujos valores obtidos para diferentes dimensões médias dos sedimentos são constantes, isto pois o parâmetro mais condicionante é a altura do escoamento.

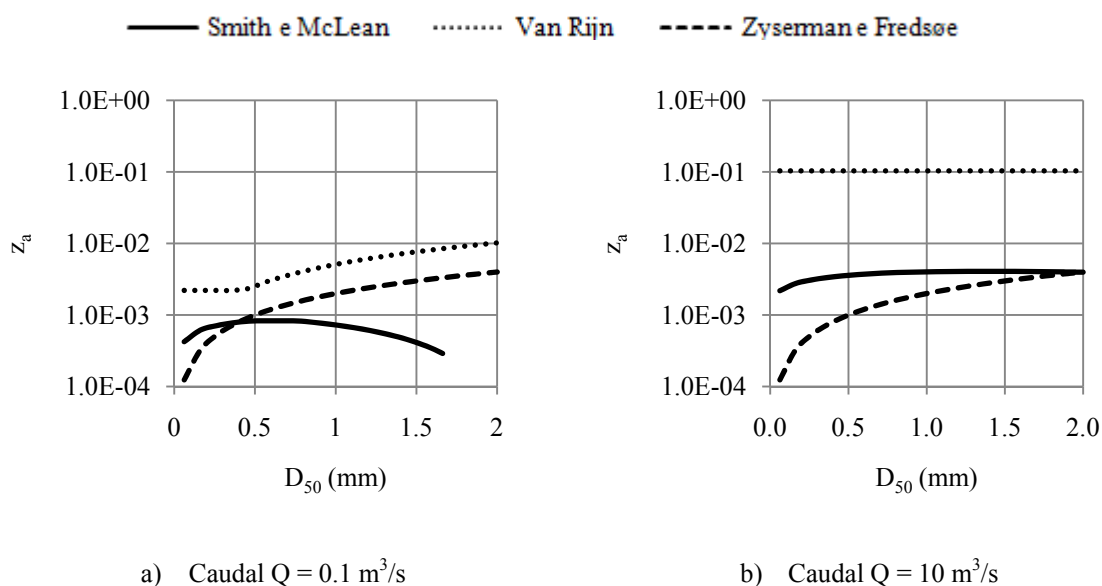


Figura 16 - Variação da distância ao fundo (z_a) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).

A escolha de um qualquer método de cálculo para determinação da distância z_a relativamente ao fundo apresenta uma grande variabilidade em relação a qualquer outro método. Na Tabela 13 encontra-se as variações relativas máximas obtidas para os diferentes métodos.

Tabela 13 - Comparação da distância ao fundo (m).

D_{50} (mm)	Q (m^3/s)	Smith e McLean	Van Rijn	Zyserman e Fredsøe	Variação máxima
0.062	0.1	4.24E-04	2.21E-03	1.24E-04	1682%
1.762		2.09E-04	8.99E-03	3.52E-03	4198%
0.062	10	2.19E-03	1.04E-01	1.24E-04	83449%
1.762		4.04E-03	1.04E-01	3.52E-03	2840%

Analisando os resultados obtidos na Tabela 13, verifica-se para caudais baixos, existe uma incerteza mais acentuada para valores da distância ao fundo associados a dimensões das partículas mais elevados ($D_{50} = 1.762 \text{ mm}$). No entanto, quando para caudais superiores ($Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$) a

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

situação inverte-se, obtendo-se maior variação relativa entre os vários métodos em estudo, para dimensões dos sedimentos mais reduzidas ($D_{50} = 0.062$ mm).

Como se pode verificar, existe uma grande variabilidade dos valores obtidos para a distância ao fundo, consoante o método em estudo, o que indica a dificuldade que existe em estimar este parâmetro.

Na Figura 17 está representada a variação da concentração de referência relativamente a cada método com a dimensão dos sedimentos para dois caudais distintos. Desta forma, facilmente se procede à comparação de resultados e à análise de sensibilidades das três propostas.

Na determinação da concentração de referência foi utilizada a mesma metodologia para determinar a respectiva distância ao fundo. Desta forma, o valor de concentração obtido para cada método está associado a uma distância z_a do fundo obtida pela aplicação do mesmo método de cálculo.

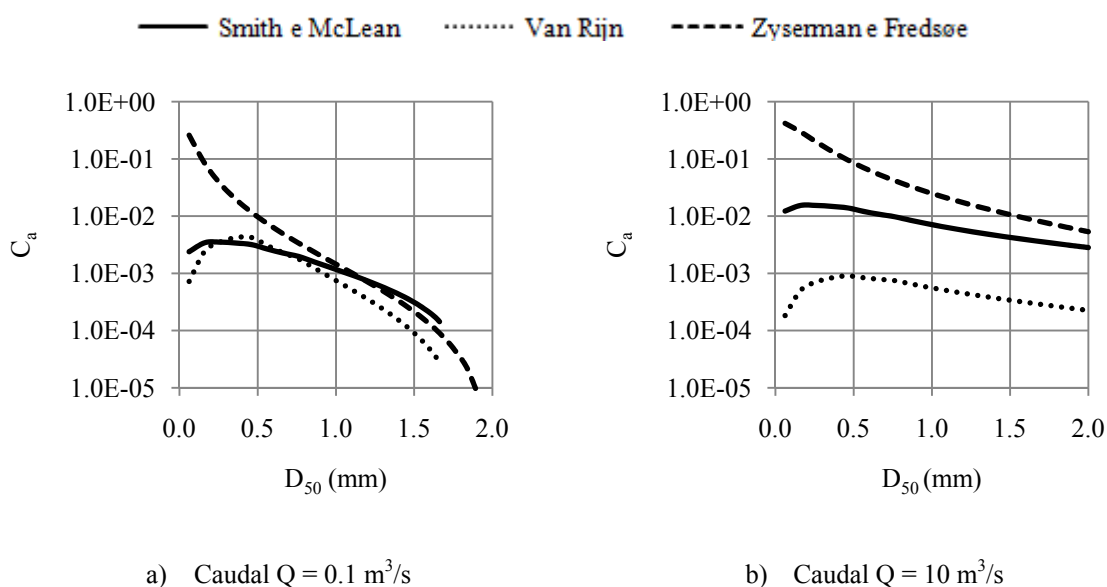


Figura 17 - Variação da concentração de referência (C_a) em função da dimensão dos sedimentos (D_{50}).

Analisando os resultados obtidos na Figura 17 verifica-se que a concentração de referência diminui com o aumento da dimensão média dos sedimentos no método de Zyserman e Fredsøe. O mesmo já não se verifica nos restantes métodos que apresentam um ligeiro aumento do valor da concentração de referência para sedimentos de menor dimensão, invertendo esta tendência para uma curva decrescente com o aumento da dimensão média dos sedimentos.

Com o aumento do caudal, não se verifica uma variação linear dos resultados de todos os métodos de cálculo. Para um aumento do caudal, os valores obtidos pelos métodos de Smith e McLean e Zyserman e Fredsøe sofrem um aumento relativamente a caudais inferiores, mas o mesmo já não ocorre para o método de Van Rijn, que para dimensões dos sedimentos inferiores a aproximadamente 1.0 mm apresenta valores de concentração de referência menores comparativamente com os resultados obtidos para caudais mais baixos.

De forma a perceber melhor as incertezas associadas na determinação da concentração de referência, na Tabela 14 encontram-se as variações relativas máximas obtidas para dimensões das partículas que apresentam resultados obtidos pelos três métodos em estudo.

Analisando os resultados obtidos na Tabela 14, verifica-se que para dimensões dos sedimentos mais reduzidas existe uma variação relativa mais elevada comparativamente com a variação obtida para dimensões mais elevadas. Pode-se ainda concluir que ao aumento do caudal está associado um aumento da incerteza entre os vários métodos e que para a mesma dimensão média dos sedimentos pode-se obter um valor de concentração muito variável, consoante o método que se utilize.

Tabela 14 - Comparação da concentração de referência.

D ₅₀ (mm)	Q (m ³ /s)	Smith e McLean	Van Rijn	Zyserman e Fredsøe	Variação máxima
0.062	0.1	2.40E-03	7.24E-04	2.61E-01	35957%
1.762		5.49E-05	6.37E-06	4.48E-05	762%
0.062	10	1.23E-02	1.84E-04	4.18E-01	227338%
1.762		3.41E-03	2.73E-04	7.31E-03	2578%

Procedendo a uma análise comparativa entre a Figura 16 e a Figura 17 verifica-se que na generalidade dos casos a concentração de referência apresenta uma relação inversão com a distância z_a em relação ao fundo, ou seja, quanto maior for a distância ao fundo menor será o valor da concentração de referência associada a essa distância.

4.3. TRANSPORTE SÓLIDO

A determinação do volume sólido transportado está dependente de inúmeros factores, dos quais alguns destes foram âmbito de estudo neste capítulo. Da mesma forma procedeu-se ao estudo dos diversos métodos para determinação do transporte sólido e avaliada a influência que alguns

parâmetros apresentam no resultado final do transporte. Nos cálculos efectuados para o estudo do transporte sólido foram considerados os pressupostos definidos previamente, relativamente às características dos sedimentos e do escoamento, para o método de cálculo a utilizar em cada parâmetro.

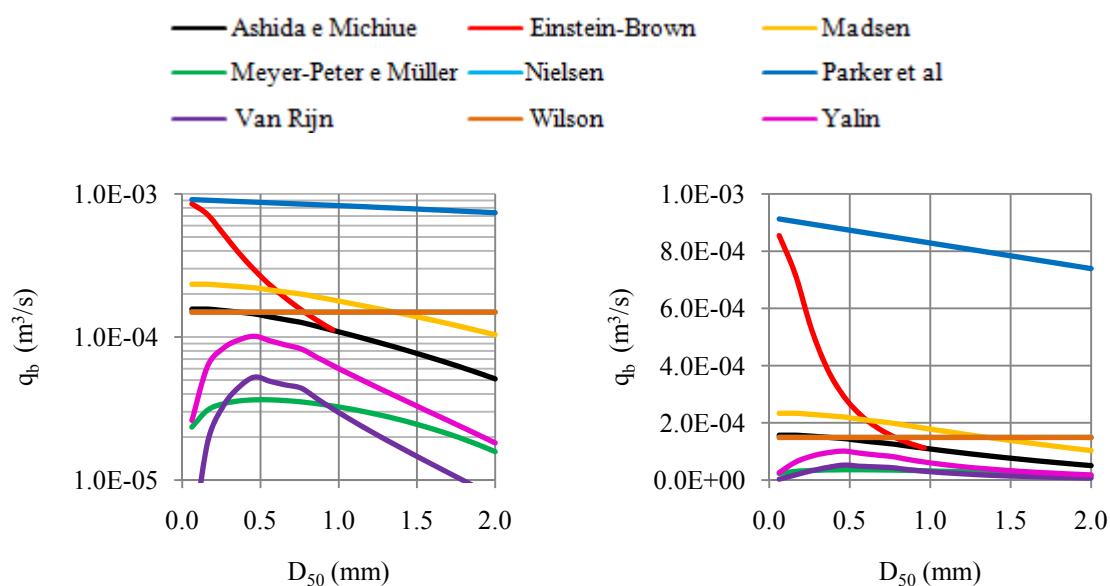
A análise efectuada consistiu na determinação dos valores do transporte sólido em função da dimensão média das partículas e fez-se variar determinados parâmetros de cálculo, nomeadamente a largura do canal (B), a inclinação do canal (i) e o caudal líquido (Q), de forma a proceder à análise de sensibilidade dos resultados destes modelos.

Na generalidade dos casos foi considerado uma largura do canal correspondente a 1 m, a inclinação de 0.1 % e um caudal de 1 m³/s. Estas considerações apenas são alteradas quando se pretende avaliar um destes parâmetros, de forma a possibilitar uma melhor compreensão da influência de cada parâmetro.

4.3.1. TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTAMENTO

O transporte sólido por arrastamento (q_b) pode ser determinado por diversos métodos, contudo neste estudo foram tidos em conta nove metodologias de cálculo para obtenção deste parâmetro. Na Figura 18 estão representados os valores do caudal sólido por arrastamento em função da dimensão média dos sedimentos considerando as características gerais anteriormente definidas. São apresentados dois gráficos contendo os mesmos resultados mas apresentados com o eixo vertical em escala diferente, um em escala logarítmica, Figura 18 a) e outro em escala linear, Figura 18 b). Esta forma de apresentação foi escolhida por possibilitar uma melhor forma de visualização dos resultados obtidos e permitir uma comparação mais precisa entre os métodos em estudo.

Perante os resultados obtidos na Figura 18, é possível verificar que nem todos os métodos apresentam uma tendência semelhante, existindo mesmo diversas orientações dentro do mesmo método. Os métodos de Ashida e Michiue, Einstein-Brown, Madsen, Nielsen e Parker *et al.* apresentam uma tendência decrescente do caudal sólido transportado por arrastamento ao longo de toda a extensão de diâmetros dos sedimentos em análise. O método de Einstein-Brown, embora apenas apresente valores até diâmetros próximos de 1 mm, descreve um decréscimo mais acentuado com o aumento da dimensão dos sedimentos.



a) Escala logarítmica.

b) Escala linear.

 Figura 18 - Caudal sólido por arrastamento (q_b) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).

Os valores resultantes da aplicação dos métodos de Meyer-Peter e Müller, Van Rijn e Yalin descrevem parábolas que apresentam um crescimento do volume transportado por arrastamento para dimensões dos sedimentos reduzidas, aproximadamente interiores a 0.5 mm. A partir desta gama de diâmetros das partículas verifica-se um comportamento semelhante ao descrito pelos restantes métodos, observando-se um decréscimo do volume transportado em função do aumento da dimensão média das partículas.

Pelo método de Wilson, são obtidos valores que não dependem da dimensão média das partículas, pelo que para condições semelhantes de caudal líquido, largura e inclinação do canal obtêm-se um valor constante de transporte sólido para qualquer valor da dimensão das partículas.

De forma a compreender com mais rigor as variações obtidas entre os métodos apresentados na Figura 18, foram determinadas as variações relativas máximas, Tabela 15, que definem o gama de valores que é possível obter consoante o método escolhido para o transporte sólido por arrastamento.

Para os valores em estudo, verifica-se que existe uma maior variação relativa para dimensões das partículas reduzidas, ou seja, para esta dimensão de sedimentos há uma maior divergência de resultados do transporte sólido por arrastamento. No entanto, na globalidade dos valores obtidos,

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

existe sempre uma grande variabilidade relativa, mesmo para dimensões dos sedimentos mais elevadas.

Tabela 15 - Comparação do transporte por arrastamento (m^3/s).

D_{50} (mm)	0.062	2.000
Ashida e Michiue	1.57E-04	5.10E-05
Einstein-Brown	8.55E-04	-
Madsen	2.34E-04	1.04E-04
Meyer-Peter e Müller	2.35E-05	1.58E-05
Nielsen	1.50E-04	1.50E-04
Parker et al	9.13E-04	7.39E-04
Van Rijn	3.44E-06	7.64E-06
Wilson	1.50E-04	1.50E-04
Yalin	2.62E-05	1.82E-05
Variação máxima	26393%	9581%

Pela complexidade de resultados obtidos para os diversos métodos, optou-se por uma análise da média dos valores do transporte sólido por arrastamento que resultam das nove metodologias analisadas, em função da inclinação do canal e fez-se variar determinados parâmetros de cálculo. Na Figura 19 apresentam-se os valores médios dos resultados obtidos pelos nove métodos estudados, para o transporte sólido em função da dimensão média das partículas.

Como se verifica, o caudal sólido por arrastamento diminui com o acréscimo da dimensão média das partículas. Este decréscimo é mais acentuado para dimensão das partículas mais baixas, existindo um valor maior de caudal sólido transportado associada às menores dimensões das partículas. Desta forma, pode-se afirmar que a dimensão das partículas é um dos parâmetros com grande influência na quantificação do caudal sólido por arrastamento, nomeadamente para dimensão das partículas mais reduzidas.

A partir dos resultados obtidos é visível que para a generalidade dos valores da dimensão das partículas, o aumento da largura do canal provoca um aumento pouco significativo do caudal sólido transportado, Figura 19 a). No entanto, é para dimensão das partículas mais baixas que se verifica

uma variação relativa mais elevada, cerca de 78% na Figura 19 a) passando esta variação para 259% na Figura 19 b). Para dimensões dos sedimentos mais elevadas (2 mm) observa-se uma aproximação dos valores do transporte sólido relativos para larguras do canal de 1 e 10 m, obtendo-se uma variação relativa menos acentuada, cerca de 39% na Figura 19 a) passando esta variação para 2% na Figura 19 b).

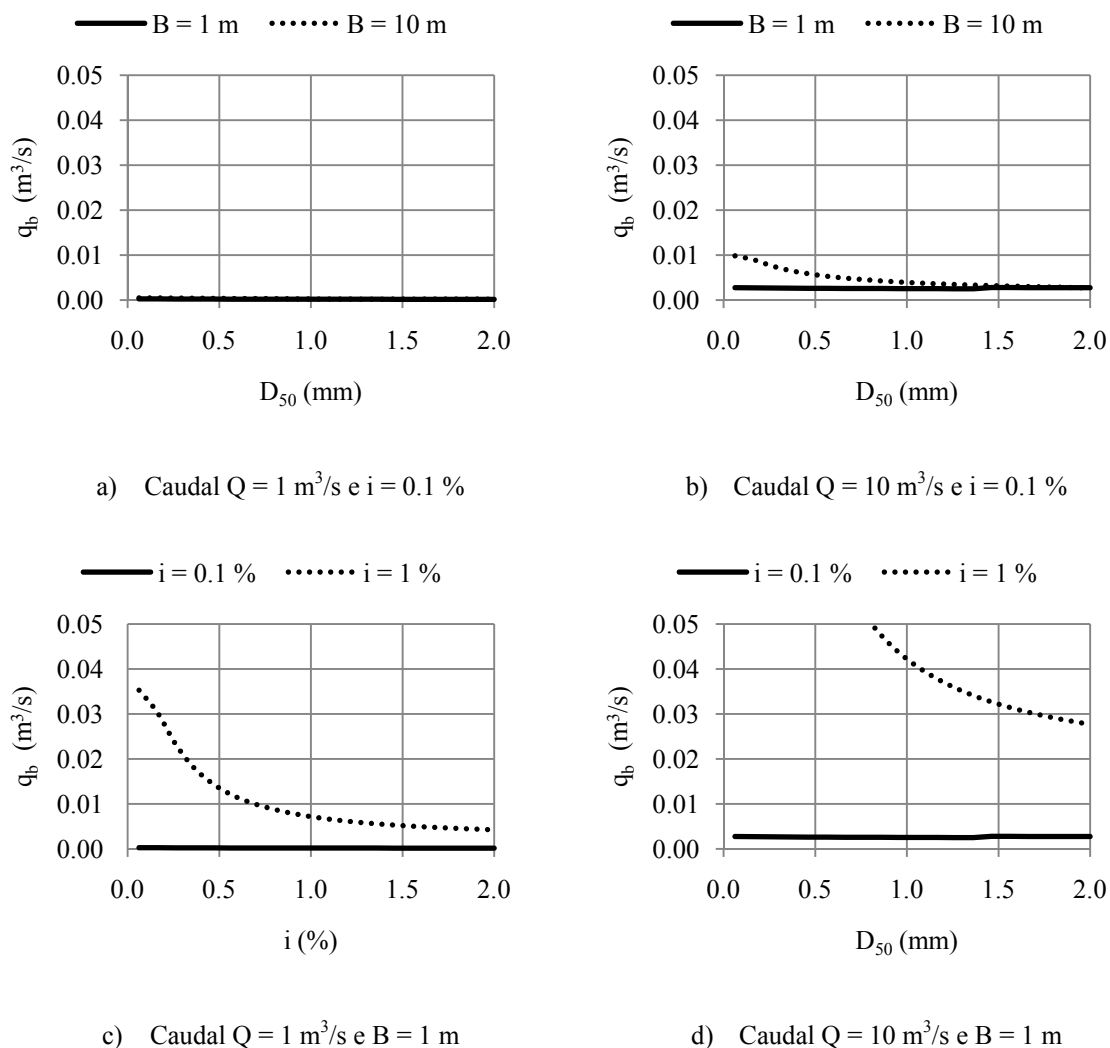


Figura 19 - Média do caudal sólido por arrastamento (q_b) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).

No caso da inclinação do canal, Figura 19 nos pontos c) e d), os resultados obtidos apresentam um acréscimo do transporte sólido por arrastamento com o aumento da inclinação e apresentam variações relativas bastante elevadas entre as diferentes inclinações. Este acréscimo do volume sólido transportado é tanto maior quanto menor for a dimensão média das partículas, existindo uma maior variação relativa entre inclinações quanto menor for a dimensão dos sedimentos. O aumento

do caudal líquido mantém uma tendência de comportamento semelhante dos valores obtidos para caudais inferiores mas provoca um acréscimo elevado do transporte sólido por arrastamento. No entanto, com este aumento verifica-se uma diminuição da variação relativa entre as diferentes inclinações em estudo.

Verifica-se também que de forma geral o caudal sólido transportado por arrastamento aumenta com o acréscimo do caudal do escoamento. Este parâmetro apresenta grande importância na determinação do transporte sólido, provocando acréscimos significativos dos valores de transporte em relação a caudais mais baixos. Esta variação é tanto mais elevada quanto menor for a dimensão média das partículas. Desta forma, quando se procede à análise do transporte sólido por arrastamento é indispensável a determinação do caudal líquido escoado da forma mais rigorosa possível.

No entanto, num canal fluvial natural o caudal pode compreender grandes variações, existindo períodos em que o caudal pode ser bastante reduzido em relação a outras alturas do ano. Como este parâmetro apresenta grande influência da determinação do transporte sólido por arrastamento, pode existir grande variabilidade do caudal sólido transportado para um mesmo curso hídrico.

4.3.2. TRANSPORTE SÓLIDO EM SUSPENSÃO

O transporte sólido em suspensão (q_s) foi obtido pela utilização do método de Van Rijn (1984) que não depende apenas do modelo de cálculo em si, mas está directamente associado a outras condições do escoamento e dos sedimentos, nomeadamente, a velocidade de queda das partículas (w_s) e a concentração de sedimentos de referência (C_a) associada à distância ao fundo (z_a).

Na Figura 20 procede-se a uma análise similar à efectuada para o transporte sólido por arrastamento, apresentando-se os resultados para o transporte sólido em suspensão em função da dimensão média das partículas.

De acordo com o analisado e referido anteriormente, nos cálculos efectuados para a determinação do caudal sólido transportado em suspensão, foi considerada a fórmula de Soulsby (1997) no cálculo da velocidade de queda das partículas e para a determinação da concentração de referência associada à distância ao fundo, o método de Van Rijn (1984).

Analisando os valores obtidos na Figura 20, verifica-se que existe uma relação directa entre o caudal sólido transportado em suspensão e a dimensão média dos sedimentos, ou seja, o aumento da dimensão das partículas provoca um decréscimo do volume de transporte. No que diz respeito

ao caudal, este factor está sempre associado ao acréscimo do volume transportado em suspensão, ampliando as variações existentes para caudais inferiores.

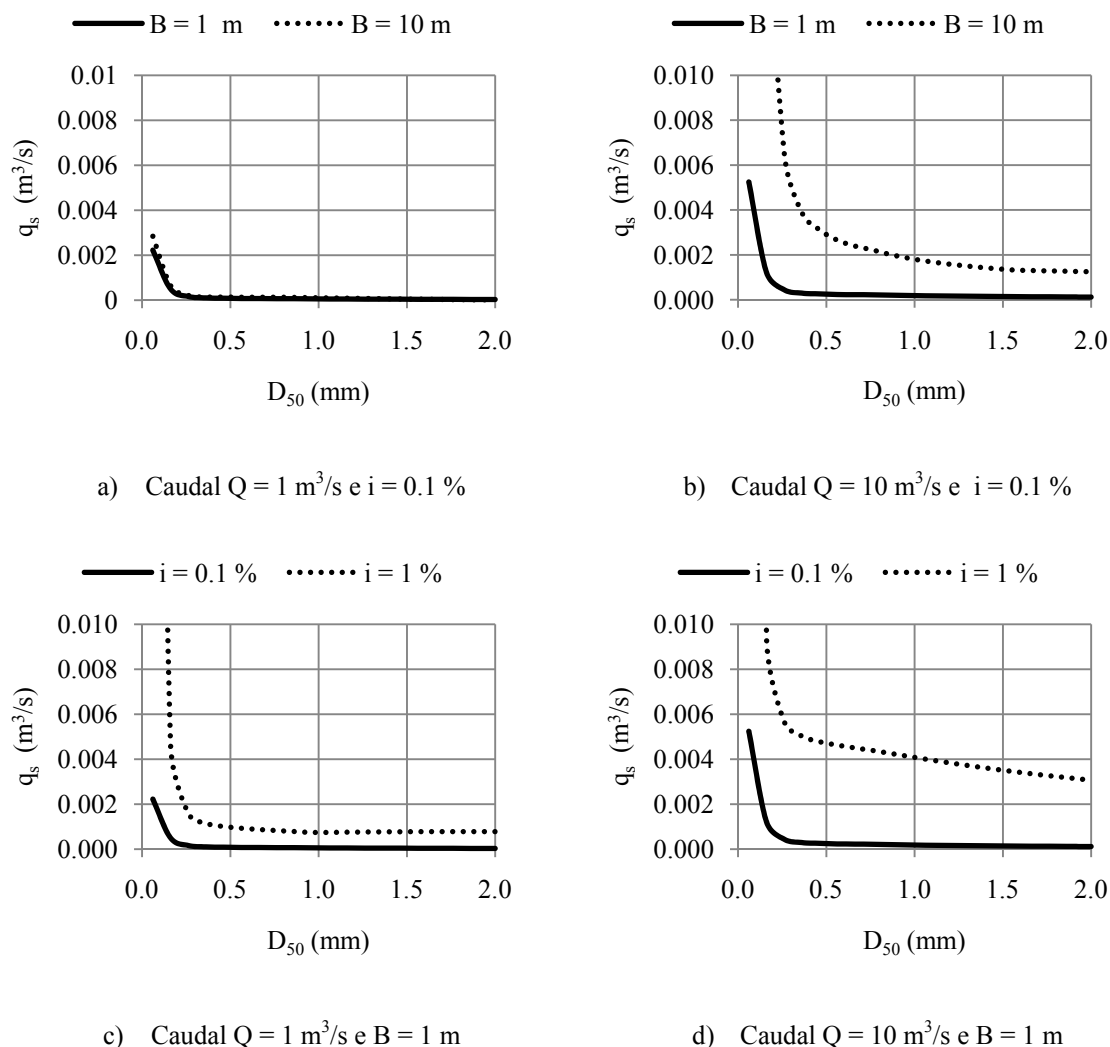


Figura 20 - Caudal sólido em suspensão (q_s) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).

O caudal sólido transportado apresenta pouca sensibilidade à variação da largura do canal para caudais líquidos relativamente baixos, Figura 20 a), obtendo-se ainda assim valores ligeiramente superiores de volume transportado para canais com largura mais elevada e para dimensões dos sedimentos mais baixas. Esta diferença é tanto maior, quanto maior for o caudal, existindo um aumento significativo da variação do caudal sólido em suspensão para um canal com larguras compreendidas entre 1 e 10 m, Figura 20 b).

A variação da inclinação do canal para as mesmas condições de modelação resulta em variações acentuadas do caudal sólido transportado em suspensão, observando um acréscimo do transporte

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

com o aumento da inclinação do canal. Este fenómeno é tanto mais acentuado quanto menor for a dimensão das partículas, verificando-se variações relativas entre os valores de transporte sólido entre inclinações mais elevadas para estas condições do que as obtidas para dimensões das partículas superiores, Figura 20 pontos c) e d).

Relativamente aos resultados descritos anteriormente, não foi avaliada a influência que outros métodos de cálculo da velocidade de queda das partículas (w_s) e da concentração de referência (C_a) e respectiva distância ao fundo (z_a) podem apresentar nos valores do volume transportado em suspensão.

Na Figura 21, encontram-se os resultados obtidos para o caudal sólido transportado em suspensão em função da dimensão média dos sedimentos obtidos pela variação do método de cálculo da velocidade de queda das partículas. Nesta análise continuam a ser consideradas as condições anteriormente descritas, ou seja, caudal líquido, largura e inclinação do canal genéricos. Desta forma, foram obtidas quatro curvas, cada uma correspondendo a uma fórmula de cálculo da velocidade de queda descritas no capítulo 2, relativo a métodos de estimativa de caudais sólidos.

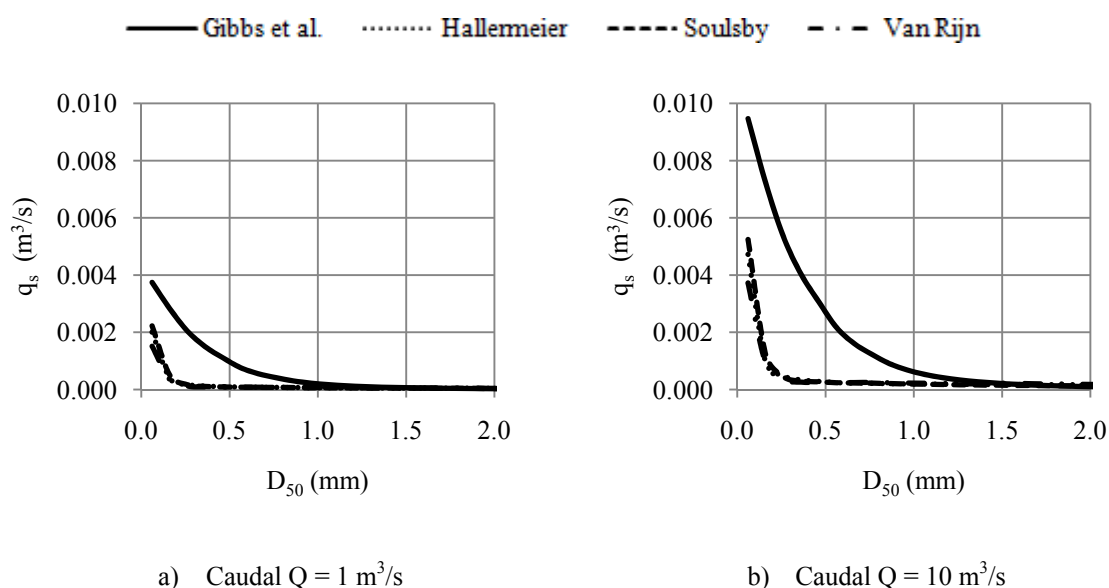


Figura 21 - Caudal sólido em suspensão (q_s) para diferentes métodos de cálculo da velocidade de queda das partículas (w_s).

Analisando os resultados obtidos verifica-se que, na generalidade das situações, o método de cálculo da velocidade de queda das partículas apresenta pouca influência no resultado do transporte sólido em suspensão. A exceção corresponde ao método de Gibbs *et al.* (1971), que provoca um notório aumento dos valores do volume sólido transportado. A variação relativa apresentada entre

este método e os restantes, é tanto maior quanto menor for a dimensão dos sedimentos, pois com o aumento da dimensão das partículas esta variação vai diminuindo.

Procedendo a uma análise comparativa entre a Figura 21 e a Figura 15, rapidamente se compreende que esta discrepância de resultados está directamente associada aos valores obtidos no método de Gibbs *et al.*, que apresenta valores de velocidade de queda bastante inferiores aos restantes métodos o que resulta num aumento do caudal sólido transportado. Os restantes métodos como apresentam valores de velocidade de queda mais próximos entre si, originam também valores próximos de transporte em suspensão.

Como se pode verificar, a velocidade de queda das partículas é um parâmetro de grande importância na determinação do caudal sólido transportado em suspensão. A diminuição deste parâmetro provoca um acréscimo do transporte, visto que quanto menor for a velocidade de sedimentação das partículas, maior será o tempo que estas permanecerão em suspensão e consecutivamente maior será o transporte em suspensão.

Foi realizada o mesmo tipo de análise referida anteriormente mas tendo em conta a concentração de referência e respectiva distância ao fundo, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 22.

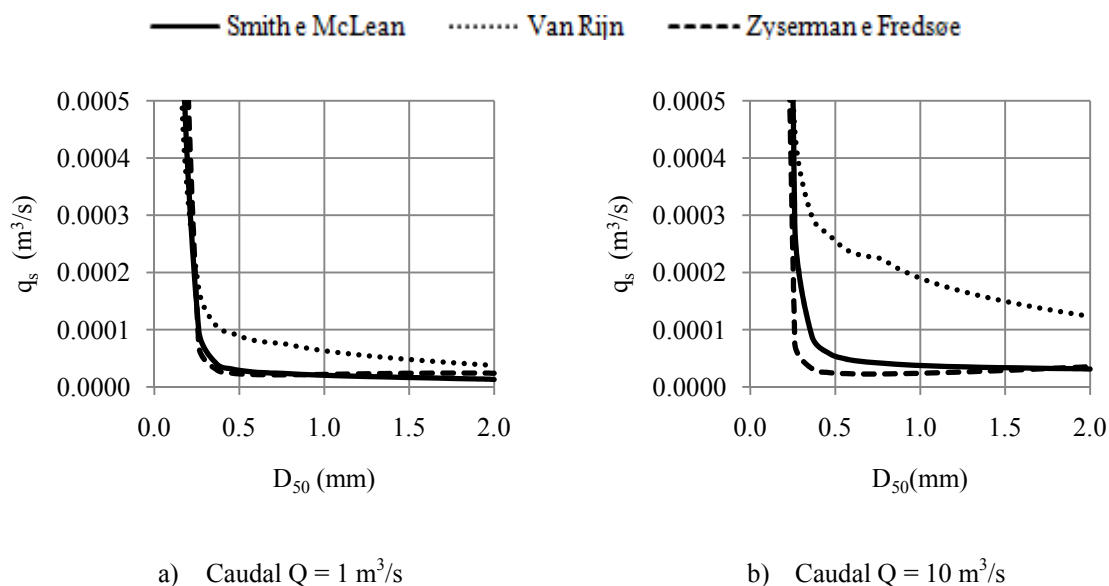


Figura 22 - Caudal sólido em suspensão (q_s) para diferente método de cálculo da concentração de referência (C_a) à distância z_a do fundo.

O transporte sólido em suspensão apresenta algumas variações, dependentes do método de cálculo escolhido para a determinação da concentração de referência e respectiva distância ao fundo. O método de Van Rijn apresenta valores mais elevados de caudal sólido transportado em suspensão

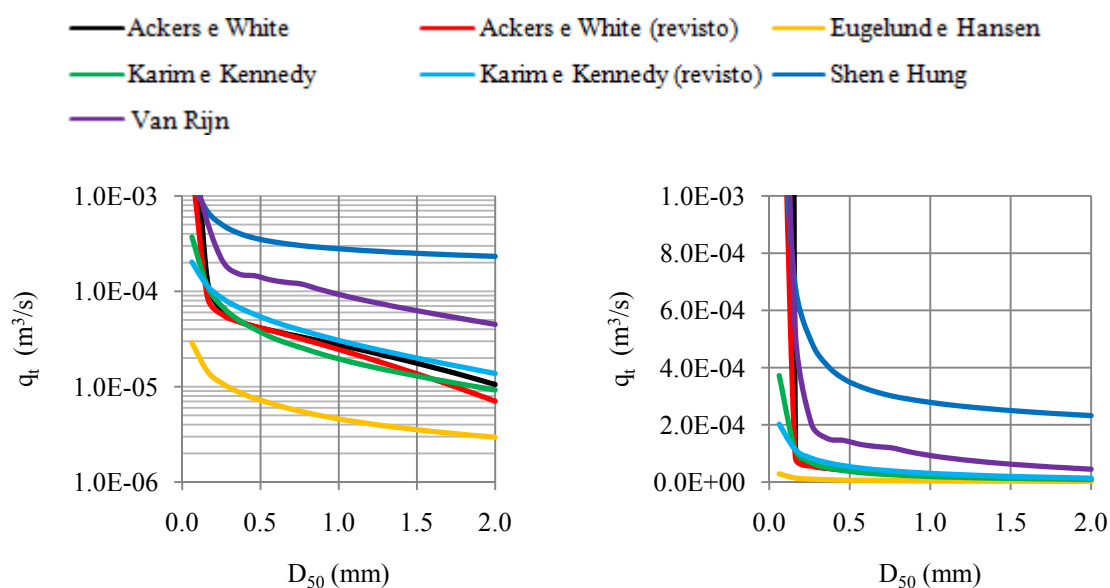
comparativamente com os valores obtidos pelos restantes modelos de cálculo. A variação relativa entre os modelos em estudo é mais elevada para diâmetros das partículas mais reduzidas. Os valores obtidos pelos métodos de Smith e McLean e de Zyserman e Fredsøe para volumes sólidos transportados em função da dimensão média das partículas são análogos, resultando em duas curvas próximas que apresentam um comportamento similar, com resultado iguais em vários pontos.

As variações descritas anteriormente, estão associadas à dificuldade de avaliar rigorosamente os parâmetros acima referidos, obtendo-se valores significativamente diferentes para a concentração de referência e distância ao fundo consoante o método utilizado para a sua determinação. No entanto, quando se procede a uma análise comparativa entre as Figura 17, Figura 16 e Figura 22, verifica-se alguma correlação entre a concentração de referência, a distância de referência em relação ao fundo e o caudal sólido transportado em suspensão, observando-se um acréscimo do transporte sólido associado à diminuição do valor da concentração de referência. Relativamente à distância de referência em relação ao fundo verifica-se a situação oposta, ou seja, quanto maior for este valor, maior será o volume sólido transportado em suspensão.

4.3.3. TRANSPORTE SÓLIDO TOTAL

O transporte sólido total (q_t) resulta da avaliação conjunta do transporte sólido por arrastamento e em suspensão, dando uma perspectiva global da capacidade de transporte de um curso hídrico. Como foi descrito no capítulo 2, existem vários métodos para determinação desta grandeza, com recurso a conceitos distintos. Para os métodos de cálculo considerados, foram determinados valores de transporte sólido em função da dimensão média dos sedimentos, estes resultados são apresentados segundo a escala logarítmica, Figura 23 a) e a escala linear, Figura 23 b), para uma melhor compreensão dos resultados obtidos para os diferentes métodos.

Analizando os valores obtidos na Figura 23, verifica-se que existe uma tendência semelhante entre os métodos em estudo, apresentando um decréscimo do volume sólido transportado em função do aumento da dimensão dos sedimentos. Este decréscimo é bastante mais acentuado para diâmetros dos sedimentos mais reduzidos, ou seja, reduzindo as dimensões dos sedimentos, o transporte sólido aumenta bruscamente, mesmo para pequenas variações de diâmetro. Da mesma forma, observa-se uma variação relativa entre os métodos em estudo mais elevada para diâmetros dos sedimentos mais baixos.



a) Escala logarítmica.

b) Escala linear.

 Figura 23 - Caudal sólido total (q_t) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).

Para a gama de valores em estudo, verifica-se que para a generalidade das situações, os resultados obtidos pelo método de Shen e Hung apresentam os valores mais elevados de transporte sólido, enquanto pelo método de Eugelund e Hansen se verifica a determinação dos valores mais reduzidos para o transporte.

 Tabela 16 - Comparação do transporte sólido total (m^3/s).

D_{50} (mm)	0.062	2.000
Ackers e White	1.79E-02	1.06E-05
Ackers e White (revisto)	2.06E-03	7.05E-06
Eugelund e Hansen	2.90E-05	2.96E-06
Karim e Kennedy	3.72E-04	9.23E-06
Karim e Kennedy (revisto)	2.02E-04	1.38E-05
Shen e Hung	1.41E-03	2.33E-04
Van Rijn	2.23E-03	4.51E-05
Variação máxima	61530%	7765%

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

Da mesma forma que se procedeu a uma avaliação da variabilidade relativa existente entre os métodos de cálculo do transporte sólido por suspensão, também para o transporte total se verificou a necessidade de realizar a mesma análise, que é apresentada na Tabela 16.

Analisando os valores apresentados na Tabela 16, verifica-se que existe uma grande variação relativa entre os métodos em estudo, que apresenta um valor bastante mais significativo para dimensões das partículas mais baixas.

Tal como se procedeu para o transporte por arrastamento, também para o transporte sólido total optou-se por se comparar os resultados da média dos diferentes métodos para a determinação do volume sólido transportado em função da dimensão média dos sedimentos. Desta forma, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 24.

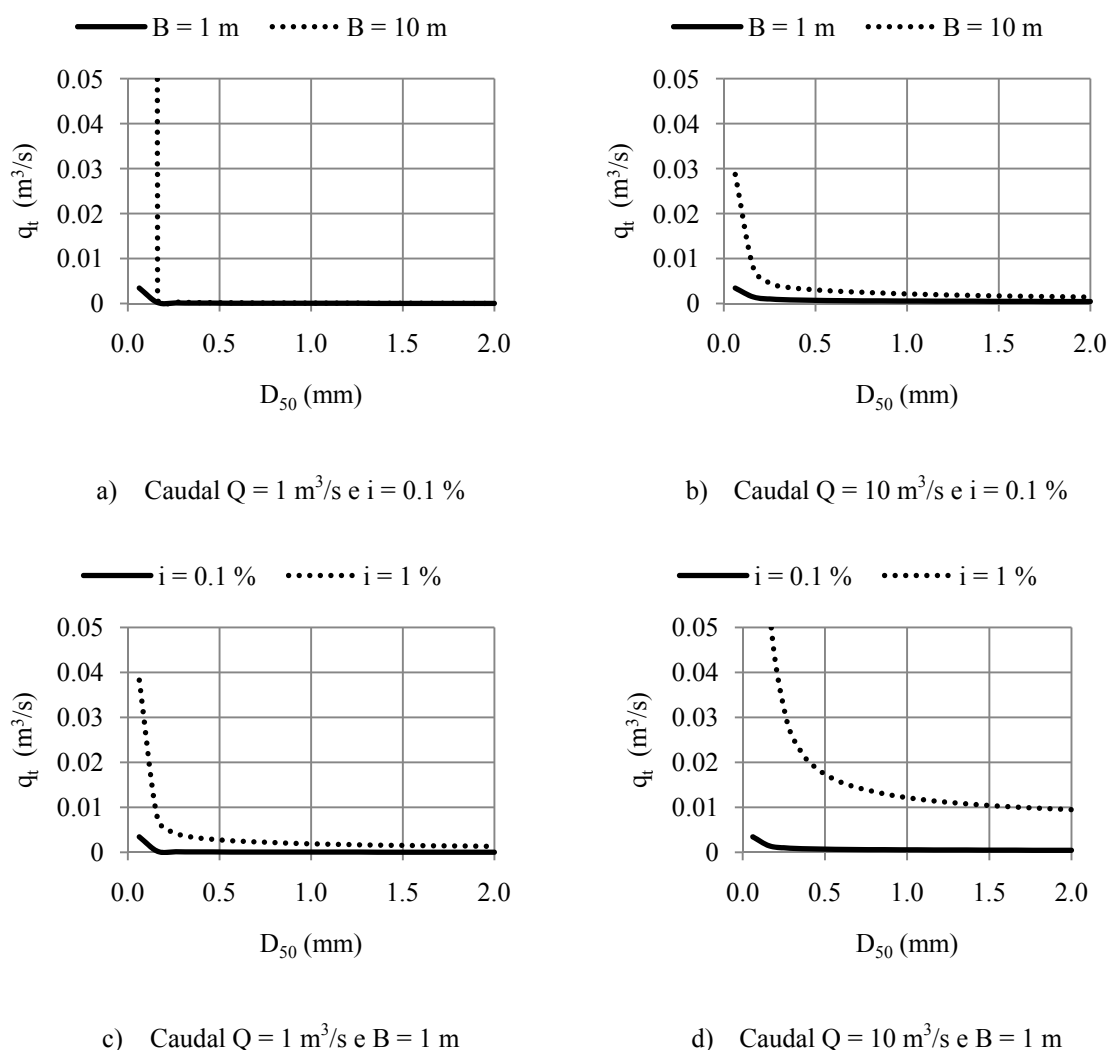


Figura 24 - Média do caudal sólido total (q_t) em função da dimensão média das partículas (D_{50}).

Analisando os resultados obtidos na Figura 24, observam-se algumas semelhanças com os valores alcançados para o transporte sólido por arrastamento e em suspensão no que diz respeito à evolução do transporte em função da dimensão das partículas, verificando-se uma diminuição do volume sólido transportado com o acréscimo da dimensão das partículas.

A partir dos resultados obtidos considerando a variação da dimensão dos sedimentos, verifica-se que tal como acontecia para os resultados obtidos na Figura 19 e na Figura 20 relativos ao transporte por arrastamento e suspensão respectivamente, quanto menor for a dimensão média das partículas, maior será a capacidade de transporte sólido.

Verifica-se um aumento acentuado do volume de transporte para dimensão das partículas aproximadamente inferiores a 0.2 mm. Para diâmetros superiores observa-se um decréscimo contínuo do transporte sólido. Desta forma, pode-se encontrar grandes variações de caudal sólido transportado num canal, quando este apresenta dimensões dos sedimentos reduzidas.

A largura do canal apresenta uma influência semelhante à verificada para o transporte por arrastamento e em suspensão. No entanto, tal como se observou na generalidade dos casos, o aumento da largura do canal provoca um acréscimo do volume de transporte sólido embora pouco significativo, como se pode observar na Figura 24 pontos a) e b). Pelos resultados obtidos, verifica-se que existe uma variação relativa, correspondente à diferença do volume transportado entre a largura de 1 m e 10 m, que diminui com o aumento da dimensão das partículas. Assim, num possível caso de estudo em que se esteja perante um canal com uma dimensão média dos sedimentos reduzida, uma pequena alteração da largura do canal pode resultar numa variação significativa do volume sólido transportado.

Analisando os efeitos que a alteração da inclinação do canal provoca nos valores do volume de transporte sólido, verifica-se que este parâmetro representa alguma importância nos fenómenos de transporte, existindo um acréscimo do transporte sólido com o aumento da inclinação. Esta particularidade é mais acentuada para diâmetros mais reduzidos.

O caudal, tal como se verificou nas situações anteriores, provoca uma significativa alteração dos valores do volume sólido transportado. O aumento do caudal está associado a um acréscimo do transporte independentemente das variações provocadas por outros parâmetros e provoca um aumento substancial da variação relativa do transporte em relação ao aumento da largura e inclinação do canal.

4.4. FRACÇÃO CORRESPONDENTE A CADA TIPO DE TRANSPORTE

Neste subcapítulo foi realizada uma análise comparativa entre a fracção de transporte correspondente ao transporte sólido por arrastamento e em suspensão, tentando-se avaliar os pesos relativos que cada uma destas parcelas representa no transporte sólido total. Para esta análise foram admitidos os resultados obtidos para as considerações anteriormente definidas de inclinação, largura e granulometria, considerando o método de Van Rijn e os valores médios obtidos pelos diferentes métodos de cálculo de cada tipo de transporte sólido. Nestes valores médios foram incluídos os resultados obtidos pelo método de Van Rijn.

Optou-se pelo método de Van Rijn porque é o único autor que apresenta uma proposta que permite a estimativa de ambas as parcelas de transporte sólido. De igual modo, também se teve em consideração a utilização dos valores médios de cada tipo de transporte, de forma a possibilitar uma avaliação global das percentagens correspondentes ao transporte sólido por arrastamento e em suspensão, possibilitando também a comparação com os valores obtidos pelo método de Van Rijn.

A determinação das percentagens associadas a cada tipo de transporte foi obtida por comparação da cada fracção de transporte com o transporte total, admitindo que o transporte total correspondente ao somatório das fracções de transporte por arrastamento e em suspensão. Na Tabela 17 são apresentados estes resultados.

Na Tabela 17 são realçados os valores das parcelas de maior peso, correspondentes à maior fracção de transporte. Analisando os valores apresentados, verifica-se que para a gama de valores em estudo, pelo método de Van Rijn existe predominantemente transporte sólido em suspensão, que é tanto maior quanto menor for a dimensão das partículas. Para dimensões das partículas de 0.062 mm verifica-se na generalidade dos casos que o transporte sólido é realizado praticamente em suspensão. Para dimensões dos sedimentos de 2.0 mm já ocorre transporte sólido por arrastamento e em suspensão, existindo mesmo assim uma maior percentagem associada ao transporte em suspensão. Verifica-se apenas um maior transporte por arrastamento para diâmetros dos sedimentos de 2.0 mm, largura do canal de 1.0 m e inclinação de 1 %, independentemente do caudal avaliado.

Avaliados os resultados obtidos para os valores médios, verifica-se menor uniformidade relativamente ao obtido pelo método de Van Rijn. Para valores médios de transporte, na generalidade, obtêm-se percentagens maiores de transporte sólido em suspensão para dimensões de sedimentos correspondentes a 0.062 mm, enquanto para dimensões de 2.0 mm se verifica uma maior percentagem de transporte por arrastamento. É de notar que para a largura do canal de 1.0 m,

inclinação de 1 % e caudal líquido de 10 m³/s, para qualquer dimensão das partículas dentro da gama de valores em estudo, obtêm-se uma maior percentagem de transporte por arrastamento.

Tabela 17 - Parcelas de transporte por arrastamento e em suspensão, no transporte total.

D ₅₀ (mm)	B (m)	i (%)	Q (m ³ /s)	Van Rijn			Valores médios		
				q _b	q _s	q _t (m ³ /s)	q _b	q _s	q _t (m ³ /s)
0.062	1.00	0.10	1.00	0%	100%	2.23E-03	11%	89%	2.51E-03
2.000				17%	83%	4.51E-05	81%	19%	1.93E-04
0.062	10.00	0.10	1.00	0%	100%	2.85E-03	15%	85%	3.35E-03
2.000				5%	95%	1.17E-05	95%	5%	2.30E-04
0.062	1.00	1.00	1.00	0%	100%	5.18E-02	41%	59%	8.69E-02
2.000				66%	34%	2.31E-03	85%	15%	5.08E-03
0.062	1.00	0.10	10.00	0%	100%	5.25E-03	35%	65%	8.03E-03
2.000				15%	85%	1.45E-04	96%	4%	2.89E-03
0.062	10.00	0.10	10.00	0%	100%	1.10E-01	8%	92%	1.20E-01
2.000				35%	65%	1.93E-03	69%	31%	4.02E-03
0.062	1.00	1.00	10.00	1%	99%	1.10E-01	64%	36%	3.01E-01
2.000				63%	37%	8.29E-03	90%	10%	3.09E-02

Analisando os resultados obtidos na sua globalidade, verifica-se que o aumento da dimensão das partículas provoca um acréscimo na parcela do transporte por arrastamento. O mesmo acontece com o aumento da inclinação do canal que provoca o acréscimo da percentagem de transporte por arrastamento. Por outro lado, constata-se que há dificuldade em avaliar as proporções de cada parcela, como se comprova pelos resultados apresentados na 4ª linha da Tabela 17, que pelo método de Van Rijn apresenta claramente uma proporção maior de transporte em suspensão, enquanto que pelos valores médios de transporte ocorre precisamente a situação inversa, ou seja, existe uma percentagem maior de transporte por arrastamento.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 17, comprova-se que em zonas de maior granulometria dos sedimentos, maior inclinação do canal e menor caudal líquido, condições típicas de um curso hídrico junto à nascente, o transporte sólido dá-se maioritariamente por arrastamento. Por outro

4. Teste de comportamento e análise de sensibilidades

lado, em situações de menor dimensão de sedimentos, menos inclinação e maior caudal, típico de situações junto à foz dos rios, o transporte é principalmente em suspensão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta dissertação incidiu sobre os fenómenos de transporte sólido em canais fluviais. Foram alvo de análise diversos métodos de determinação do caudal sólido transportado e foram estudados parâmetros que apresentam grande importância na estimativa do volume sólido transportado, analisando a influência e a interacção existentes entre estes parâmetros e o resultado final do transporte sólido. Para realização deste estudo foi concebida uma ferramenta de cálculo automático que permite a obtenção rápida de um número considerável de resultados para os fenómenos em análise, possibilitando uma clara percepção das variações provocadas por alteração de uma ou mais características do curso hídrico em estudo. Este capítulo apresenta um resumo de todo o trabalho desenvolvido, destacando as principais conclusões e projectando desenvolvimentos futuros.

5.1. SÍNTESE DE RESULTADOS

Neste subcapítulo pretende-se resumir e realçar alguns dos aspectos considerados de maior relevância no desenvolvimento dos diversos capítulos da dissertação. Após o capítulo inicial, onde é descrito o âmbito do trabalho desenvolvido, introduzido alguns dos problemas e o contexto em que se inserem, foram apresentados cinco capítulos. São esses capítulos que são alvo de análise nesta secção.

No capítulo 2, ficou presente a ideia que existe alguma dificuldade em quantificar o caudal sólido transportado, existindo uma grande variabilidade de métodos para determinação do transporte sólido que seguem por vezes conceitos e pressupostos diferentes. São apresentados métodos que foram obtidos para condições distintas no que diz respeito às características dos sedimentos e do escoamento, existindo métodos cuja aplicação se destina a canais com sedimentos mais grosseiros ou condições de escoamento com maior inclinação correspondendo a situações de secções mais a montante, situadas perto da nascente, pelo que alguns dos métodos em estudo possuem limitações de aplicabilidade.

Algumas das condições de aplicabilidade encontradas nas metodologias estudadas estão associadas à determinação da tensão crítica de arrastamento, o método de Lane (1955) deve ser utilizado apenas para valores de D_{50} superiores a 2 mm. A determinação da velocidade crítica segundo o método de Van Rijn apresenta um intervalo de aplicação para valores de D_{50} compreendidos entre 0.1 mm e 2.0 mm. O cálculo do caudal sólido transportado por arrastamento apresentado por

Wilson (1972) é aplicado para situações em que o valor do parâmetro de Shields (Y) é bastante superior ao parâmetro crítico de Shields (Y_{cr}).

No estudo efectuado sobre métodos de estimativa do caudal sólido transportado verificou-se que existe uma carência de modelos que permitam a determinação do transporte sólido em suspensão comparativamente com as restantes fracções de transporte, nomeadamente, por arrastamento e total. Também se verificou que nem todos os autores são coerentes quando se coloca o problema de definir as fracções do transporte sólido por arrastamento e em suspensão, existindo por vezes definições variadas para o mesmo conceito.

Da pesquisa efectuada ficou presente que não é fácil estimar de forma rigorosa o caudal sólido transportado num canal, existindo inúmeros factores que intervêm neste processo. A escolha do método de cálculo para estimar o caudal sólido deve ter em conta as condições de aplicabilidade e as condições em que este foi concebido de forma a obter uma estimativa mais rigorosa do volume sólido transportado

No capítulo 3 verificou-se que a conciliação dos modelos de estimativa do caudal sólido transportado com a ferramenta de cálculo nem sempre foi atingível, surgindo por vezes algumas dificuldades para conseguir integrar alguns dos métodos pesquisados, por apresentarem recurso a métodos gráficos ou a cálculo com recurso a integrais. Não foram encontradas ferramentas que possibilitassem abordagem destes métodos de forma automática, pelo que se optou pela não integração destes métodos na elaboração das folhas de cálculo.

No capítulo 4 foram inicialmente apresentados os resultados para caracterização do movimento, existindo duas abordagens distintas para determinação deste parâmetro. Contudo, estes dois métodos para determinação do mesmo conceito podem levar a situações ambíguas, ou seja, numa situação limite pode-se obter resultados diferentes entre o conceito da tensão crítica e da velocidade crítica, em que por um dos modelos é admitido movimento das partículas enquanto pelo outro conceito não se verifica movimento. Por outro lado, verificou-se que a caracterização das condições de início de movimento segundo o conceito da velocidade crítica apresenta menores variações relativas entre os diversos métodos que permitem estimar este parâmetro, comparativamente com os resultados obtidos pelo conceito da tensão crítica de arrastamento.

No estudo dos fenómenos associados ao transporte sólido verificou-se que nem todos os métodos apresentam uma tendência semelhante, observando-se por vezes um ou outro método que apresenta resultados divergentes comparativamente com outros métodos para determinação do mesmo parâmetro. Verificou-se que a concentração de referência apresenta uma tendência de

comportamento inversa à apresentada pela distância z_a em relação ao fundo, ou seja, um aumento da distância ao fundo provoca um decréscimo da concentração.

Em relação à estimativa do caudal sólido, foi efectuada uma análise de sensibilidades e de comparação entre métodos, que permitiu concluir que à tradução matemática dos fenómenos ainda está associada uma elevada incerteza. No entanto esta análise permitiu verificar que de um modo geral, a variação da dimensão das partículas, da inclinação do canal e do caudal líquido provoca grandes alterações no volume sólido transportado. Comprovou-se que, na generalidade das situações, o aumento da dimensão das partículas está associado a um decréscimo do transporte sólido. Por outro lado, o aumento da inclinação e do caudal líquido de um curso hídrico está aliado a um acréscimo substancial do transporte sólido.

Da análise efectuada para as parcelas de transporte por arrastamento e em suspensão conclui-se que a dimensão das partículas e a inclinação são determinantes na determinação na proporção de transporte correspondente a cada fracção. Verifica-se que para dimensões das partículas reduzidas e para inclinações baixas o transporte é predominantemente efectuado em suspensão, estas condições são análogas às existentes em canais junto à foz. Por outro lado, comprova-se que nas zonas de maior granulometria e inclinação e menor caudal, caso típico de nascentes de rios, o transporte se dá maioritariamente por arrastamento.

A aplicação de modelos de estimativa de caudais sólidos está dependente da caracterização dos elementos intervenientes nos processos, pelo que as propriedades do escoamento e dos sedimentos são necessariamente avaliadas. Na generalidade, estas propriedades são bem conhecidas e de fácil estimativa, mas refere-se por exemplo, a dimensão característica dos sedimentos como uma grandeza fundamental, mas com uma distribuição espacial e temporal muito variável. Tal como a dimensão das areias, a inclinação do canal e o caudal líquido é variável no tempo e no espaço e é importante em numerosas aplicações de engenharia fluvial.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nesta dissertação foi proporcionada uma visão global dos fenómenos associados ao transporte sólido ocorrido em canais fluviais, permitindo a respectiva interligação e relacionamento com os factores adjacentes que influenciam o comportamento e determinam o volume sólido transportado.

No entanto, ficam em aberto diversos aspectos que interessará desenvolver no futuro. Desta forma podem ser implementados novos métodos para determinação dos parâmetros que influenciam a

determinação do volume transportado e também novas formulações para o cálculo do caudal sólido transportado, nomeadamente no que diz respeito ao transporte sólido em suspensão, que apresenta um menor número de métodos que permitam a determinação desta fracção de transporte.

A aplicação da ferramenta de cálculo automático deve ser explorada com necessários cuidados. A utilização da ferramenta apresentada requer uma correcta ponderação e conhecimento dos métodos em utilização. A capacidade de efectuar a estimativa dos parâmetros de transporte só pode ser conseguida com alguma segurança após comparação dos resultados obtidos com situações modeladas em laboratório e recorrendo a dados existentes de estudos efectuados em casos reais com diferentes características, de forma avaliar as incertezas e permitir a comparação com os métodos em estudo.

Entende-se que o conhecimento do caudal sólido transportado é fundamental na compreensão dos fenómenos hidráulicos, permitindo conhecer e prever erosões em margens, fundos ou junto de singularidades ou assoreamentos em margens, albufeiras, vias navegáveis, circuitos hidráulicos, captações, bem como dimensionar canais estáveis, sem movimento de material sólido. O conhecimento deste fenómeno continua a ser um desafio para equipas de investigação. Devido à grande complexidade envolvida, é ainda limitada a capacidade de traduzir os comportamentos físicos em modelos numéricos. A elaboração de uma ferramenta de cálculo automático pode ser um auxiliar precioso nesse campo, permitindo a comparação e comprovação de comportamentos pontuais específicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, Diego Wohlers da F., Suzana Santos Costa e Sérgio A. B. da Fontoura. 2007. *Estudo de Correlações de Velocidade de Sedimentação de Partículas para Fluidos Não-Newtonianos Aplicados a Problemas de Limpeza de Poços de Petróleo*, 4º PDPETRO, 9 p.
http://www.gtep.civ.puc-rio.br/img_banco/artigos/limpeza_pocos.pdf
- Álvares, Maria Teresa Ponce e Maria Teresa Pimenta. 1998. *Erosão Hidrica e Transporte Sólido em pequenas Bacias Hidrográficas*, 4º CONGRESSO DA ÁGUA, 9 p.
<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/149.pdf>
- Cardoso, António Heleno. 1998. *Hidráulica Fluvial*. Lisboa: Fundação Caloute Gulbenkian. 314 p.
- CCDRC. 2002. *Plano de Bacia Hidrográfica do Mondego - Análise do Risco de Erosão e Assoreamento*, Comissão de coordenação e desenvolvimento regional do centro
www.ccdrc.pt/regiao/bacias-hidrograficas/mondego/anexo12_mondego.pdf
- Chang, Howard H. 1998. *Fluvial Processes in River Engineering*. Malabar (FL): Krieger Publishing Company. XIII, 432 p.
- Coelho, Carlos. 2006. *Hidráulica Fluvial*, Universidade de Aveiro: Departamento de Engenharia Civil, 108 p. <http://elearning.ua.pt/>
- Coelho, Carlos, António Facão, Pedro Rodrigues e Paulo Silva. 2007. *Comportamento Sedimentar na Embocadura da Barra de Aveiro*, 23 p. (por publicar).
- Junior, Fadiga e Francisco Martins. 1993. *Modelo Hidrodinamico-Sedimentologico Unidimensional*. São Paulo, 18 p. <http://www.fcth.br/public/cursos/phd5023/transpsolido.pdf>
- Lencastre, A e F M Franco. 1992. *Lições de Hidrologia*. Lisboa: Universidade Nova. Faculdade de Ciências e Tecnologia. 453 p.
- Liu, Zhou. 2001. *Sediment Transport*. Aalborg Universitet, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, 75 p.
http://lvov.weizmann.ac.il/Literature-Online/Literature/Books/2001_Sediment_Transport.pdf
- Netto, Azevedo, Miguel Fernandez y Fernandez e Roberto de Araujo e Acácio Eiji Ito. 1998. *Manual de hidráulica*. São Paulo: Edgar Blucher. 669 p.
- Ramísio, Paulo J. 2005. *Conceitos fundamentais de hidráulica, bombas centrífugas e redes hidráulicas*, 30 p. <http://hdl.handle.net/1822/4615>
- Soulsby, Richard. 1997. *Dynamics of Marine Sands*. London: Thomas Telford. XXI, 249 p.
- UM. 2007. *Propriedades dos Fluidos e dos Escoamentos*, Universidade da Madeira: Departamento de Matemáticas e Engenharias, 8 p.
<http://dme.uma.pt/people/faculty/herlander.lima/Doc%20Hidraulica/02Propriedade%20Fluidos%200Escoamentos.pdf>
- Wikipédia. 2007. *Aceleração da gravidade*: Wikipédia, a enciclopédia livre
http://pt.wikipedia.org/wiki/Acelera%C3%A7%C3%A3o_da_gravidade